

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Tom I.
Rok 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя Ф. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваў, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне будаўніцтва і архітэктуры, геадэзіі і картаграфіі, геаэкалогіі і транспарту.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия F. Строительство. Прикладные науки

В серии F научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области строительства и архитектуры, геодезии и картографии, геоэкологии и транспорта.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series F. Civil engineering. Applied sciences

Series F includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in civil engineering and architecture, geodesy and cartography, geoecology and transport.

Адрес редакции:
Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 53 34 58, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск А.А. Бакатович, Г.И. Захаркина, В.В. Булах, В.И. Мицкевич, В.К. Липский.
Редактор Р.Н. Авласенок. Техн. редактор Р.Н. Авласенок.

Подписано к печати 26.06.2012. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 19,99. Уч.-изд. л. 24,09. Тираж 100 экз. Заказ 1052.

АРХИТЕКТУРА

УДК 726.71(476)(091)

МОДЕЛЬ СВЯТОЙ ЗЕМЛИ В САКРАЛЬНОЙ ТОПОГРАФИИ ПОЛОЦКА

канд. искусствоведения, доц. Г.А. ЛАВРЕЦКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается развитие архитектуры в Полоцке как яркий пример использования византийской, древнерусской и западноевропейской традиции в создании модели Святой Земли. Четкая планировочная система, сложившаяся на Полоцкой Земле в период ее расцвета, стала основой развития новой образной структуры в XV веке. Сопоставление с историческими источниками и архитектурными сооружениями показало, что такие же процессы происходили во многих христианских странах. Общехристианские ценности, тождественность исторических, культурных и духовных процессов дают нам основание видеть в создании новых и перестройке существовавших белорусских храмов, и в первую очередь полоцких, знаковое событие. Роль Полоцка как основного экономического и прежде всего духовного центра несомненно повлияла на тенденции рассматривать его как православный Иерусалим.

Введение. Проанализировав некоторые из попыток воспроизведения или, точнее, знаменования храма Гроба Господня в европейской архитектуре, мы увидим, что набор заимствуемых элементов, который формирует своеобразные архитектурные структуры, в каждом случае оказывается различным. Поэтому ни один из этих объектов нельзя назвать в полной мере копией. В процессе выявления основных, знаковых элементов первообраза происходит отбор, а затем новый синтез некоторых черт оригинала с добавлением новых, не свойственных первоисточнику. «Архитектор средневековой копии не стремился воспроизвести детальный внешний вид прототипа, а лишь намеревался передать какие-то сущностные его черты как *memento o святой стороне* и одновременно символ обещанного спасения» [1, с. 28]. Можно говорить о перенесении в архитектурное творчество свойственного иконописанию понятия списка. В основе церковного искусства положено Предание. Это особое отношение к наиболее почитаемой святыне. Храм ли с заключенным в нем образом, икона ли, для поклонения которой в дальние страны отправлялись вереницы паломников, зачастую были первыми звеньями в сложной и длительной цепи постоянно воспроизведения. Необходимо осознать, что копия с иконы и список с иконы – понятия разные. Мастер, для которого иконописание – церковное служение, видит в иконе-образце не объект штудии, а источник творческого озарения. Условия канона, в которых развивается церковное искусство, позволяют иконописцу или зодчему с наибольшей полнотой проявить себя как творческую личность. Отсюда и своеобразие множества иконописных и архитектурных школ.

Основная часть. Особенности отношения списка к оригиналу обладали и полоцкие храмы. Строительство в XV веке новой святыни в Полоцке, которая должна была быть довольно внушительной, потребовало бы много экономических и технических усилий. Возможно, в ряду других причин это привело к мысли о перестройке уже существующего, соответствующего по своим параметрам храма. К тому времени в Детинце существовали две крупные православные церкви: Софийский собор, построенный в XI веке, и так называемый «храм в Детинце» – памятник полоцкой школы зодчества XII века. Неподалеку находился «храм на Рву» [2, с. 95]. Как свидетельствуют графические материалы XVI века, все эти святыни ко времени осады Полоцка Стефаном Баторием были основательно перестроены в соответствии с изменившимися функциональными и идеологическими факторами. Поэтому обычно идет речь об оборонительных башнях. Эти башни видны на гравюрах, иллюстрирующих осаду. Гравюра, выполненная С. Пахоловецким, дает панораму боя со стороны излучины р. Полоты. Другая – с противоположной стороны. Эти гравюры хорошо фиксируют два этапа разрушения Софийского собора. Третья гравюра дает воспроизведение фрагмента укреплений из-за Двины, показывая состояние Полоцка после взятия города Стефаном Баторием. Здесь мы видим два сооружения. Одно из них представляет собой базиликальную (трехнефную?) постройку (собор Воскресенского монастыря?), а другая – круглую ярусную (Софийский собор?). Что касается храма, расположенного неподалеку от собора Святой Софии, то, возможно, во время создания гравюр он еще хранил вид базилики с ротондой, воспроизводя композицию храма Гроба Господня в Иерусалиме. Судя по всему, это и есть храм Свято-Воскресенского (Мошоноцкого) монастыря [3, с. 173]. О том, как был перестроен храм на Рву, говорить можно весьма предположительно. Тот вид, в котором этот храм представлен на гравюрах, он обрел, вероятно, после осады и фактического

уничтожения города войсками Ивана Грозного. Тогда на руинах полоцкой модели одной из христианских святынь Иерусалима была возведена восьмигранная оборонительная башня, о которой обычно упоминают исследователи.

Появление памятников-символов Святой Земли было неудивительно на рубеже XV – XVI веков. Идея спасения, искупления для христиан выражалась в паломничестве, которое было особой формой покаяния, испытания, средством очищения, подготовкой к Судному дню. Иерусалим для средневекового христианства – тема вневременная. Имя священного града – символ обета, а земной осязаемый Иерусалим – образ, икона Небесного города, как и любое явление в обыденности. Вся жизнь христианина – восхождение к Небесному граду. Реальное паломничество могло быть заменено символическими хождениями, совершавшимися по храмам города, часовням одного и того же храма, от одной иконы к другой. Пример тому – впечатления священноинока Варсонофия: «...Святое ж место снятие со креста пядей в длину... Идучи ко кресту... есть... лестницы каменные... и ту есть церковь святого апостола Якова... и в другой же лестницы ступени и ту есть другая служба, церковь воздвижение...» [4, с. 4 – 5]. На Западе практиковалось ползание на коленях по лабиринту, награвированному на полу собора; иногда в центре такого лабиринта писали «Иерусалим», или «Гроб Господень» [5, с. 88, прим. 8]. В византийской традиции также известны такие символические паломничества, пример тому – изображение на полу храмов панорамы самого Иерусалима.

Если учесть, что к XIV – XV векам в Полоцке и в предместьях города сохранились святыни более раннего периода, о которых упоминалось в белорусско-немецких грамотах [6, с. 121], то по посвящениям (престольным праздникам) храмов можно детерминировать иерусалимскую тему. И в этой системе особое место принадлежало Софийскому собору. В иерархии Полоцка – Иерусалима – ему могло отводиться место Скинии (Святая Святых). Сохранившийся иконографический материал позволяет провести гипотетическую графическую реконструкцию собора Св. Софии середины XVI века. Все перестройки производились на основании планировки XI века. Места угловых башен определялись угловыми ячейками девятиполюя основного объема. Теперь объем храма стал более компактным, подчеркнуто центричным. В этом случае проявилась и структура угловых глав: на всю высоту основного объема до закомар они были в сечении квадратными, а выше – круглыми. В гравюрах и рисунках такая ступенчатость иногда не учитывалась, к тому же такая фиксация не являлась целью этих батальных панорам. Поэтому на планах 1707 года и София, и храмы в городе приняли вид своеобразных пиктограмм, условных обозначений. На рисунках же Пахоловецкого (особенно на сделанном со стороны Двины, фиксирующем момент штурма) хорошо видна их геометричность.

Благодаря связям Полоцка с немецкими городами могло возникнуть и знакомство с давними западноевропейскими традициями относительно Второго Иерусалима, в частности в Аахене. Это также могло вдохновить Полоцк на создание подобного Православного Иерусалима. Возникновение на основе храмового ансамбля на берегу Западной Двины в Полоцке «моделей» важнейших святынь Иерусалима было вполне оправданным. Первым этапом реализации этой идеи должно было стать топонимическое соответствие. В качестве параллели горе Голгофе было избрано место около древнего Детинца, который с XIV века стал именоваться Верхней Замковой Горой [7, с. 167]. Возможно, Софийский собор, храм в Детинце и храм на Рву (Воскресенский?) также были перестроены в соответствии с новым маршрутом символического паломничества по Святой Земле. На такую мысль наводит факт упоминания в белорусско-немецких грамотах Воскресенского монастыря на Нижнем Замке [6, с. 121]. Идея благочестивого паломничества, объединяющая временную, пространственную и нравственную категории в сознании православного христианина, обнаруживается с особой очевидностью. Несомненно, в этой пространственной теофании Спасо-Евфросиниевский монастырь принимал образ горы Фавор.

Тема воспроизведения Иерусалимского храма в белорусских городах была также популярна. Достаточно взглянуть на гравюру Гродно, выполненную Гансом Адельгаузером, а затем выгравированную Матвеем Цюндталем «гражданином Нюрнбергским» в 1568 году. Особое внимание привлекает круглый в плане, многоярусный храм Креста, являющийся композиционным центром нижней части города. Явно не случайны и посвящение храма такого необычного очертания, и вид перестроенных храмов XII века – Борисо-Глебской и Пречистенской церквей. Обе они имеют шатровое перекрытие. В такой распространенной для средневековья традиции воспроизводить образ Иерусалима ощущается надежда на спасение после Конца Света. Герман, патриарх константинопольский, говорил: Она (церковь – Г. Л.) служит напоминанием распятия, и погребения, и воскресения Христова...». Из грамоты Киевского Митрополита Иосифа Солтана 1511 года со списком виленских храмов также можно понять, что косвенно тема Иерусалима коснулась и столицы Великого княжества Литовского.

Иерусалимская святыня была хорошо известна многим христианам не только древнебелорусских земель, но и других государств Европы. «Хождения» в Святую землю были весьма распространены. Сформировался значительный литературный фонд, посвященный описанию святынь. Есть заметки палом-

ников и мастеров, направляемых в Иерусалим специально для изучения и обмера святыни. Примером тому является «Хождение архимандрита Графенья обители пресвященныя Богородицы в Иерусалим» [8, с. 7]. Автор его, архимандрит Леонид, был настоятелем монастыря Успенский Отроц в Твери [9, с. 89]. Это сочинение интересно еще и потому, что архимандрит указывает маршрут следования в Святую Землю через земли Великого княжества Литовского.

В искусстве Новгорода тема Гроба Господня была популярна с XIII века. Это было связано с паломничествами в Святую Землю, которые продолжались и в XIV веке. Так, в 1348 – 1349 годах в Царьград и Иерусалим ходил Стефан Новгородский [10, с. 56 – 58]. Архиепископ Василий также был «самовидцем» земного рая. В 1445 году уже упоминается церковь Жен Мироносиц. В XV веке производится довольно большое количество иконок с изображением Гроба Господня. Москва повела решительную борьбу с новгородскими «шатаниями». Наступление московского догматизма пресекло их бытование [11, с. 223 – 236]. В 1467 году в Новгороде возникает идея построения семи церквей в честь семи вселенских соборов и семи веков. Возможно, именно полоцкий «почин» нашел в этой инициативе новое содержание. «Времена и лета седминым числом исчисляемы суть» – полагал Геннадий Новгородский. Так ожидание конца света связалось с церковно-строительной программой.

Автор знаменитой «Пereгринации» Николай Христофор Радзивилл Сиротка совершил паломничество в Святую Землю в 1582 – 1584 годах и составил описание Иерусалимской церкви: «Отметить надо, что вся ее громада из красивых и больших квадратных камней, с башнею под колокола, высоко в виде креста построена... Стены в четырех углах сходятся, т.е. на четыре стороны сложенные, только на восток и на запад полукруглыми стали... Над самим Гробом Господним купол церковный, свод круглый, до половины выпуклый, а остальное трамы фугованные закрывают» [12, с. 281].

Паломничества в Святую Землю запечатлевались не только в многочисленных описаниях, но и изображениях, и моделях, выполненных «по подлиннику, как составляется Святая Святых». Один из таких образов Иерусалима мы видим в миниатюре Хлудовской псалтири. Трактровка его архитектуры довольно подробна. «Башня и примыкающий храм (по своей типологии – базиликальный) и есть изображение комплекса Гроба Господня в Иерусалиме, в состав которого входили базилика Мартириум и примыкавшая к ней с восточной стороны ротонда храма Воскресения» [13, с. 18]. Это изображение вполне сопоставимо с панорамами Полоцка, на основании которых можно говорить о том, что в архитектуре перестроенных храмов соединились две темы. С одной стороны, это последовательность в воспроизведении характерных форм (полукруглый западный фасад, обстройка основного объема множеством помещений, акцентированный объем над Святой Святых); с другой – учет как климатических и экономических условий, так и традиционных строительных навыков.

Издавна в качестве символа вечности после земной жизни в христианской архитектуре использовался октагон. Начиная с раннего средневековья октагон содержал в себе и «сионскую суть»: храм Гроба Господня виделся средневековым архитекторам именно в виде восьмиугольника. Октагон присутствует во многих памятниках X – XVIII веков. Именно эта семантическая определенность и была положена в основу образа перестроенного храма в Полоцке. На гравюрах XVI века явно прочитывается базиликальная система переустроенного храма с примыкающей башней. Художники подробно фиксируют этот архитектурно-композиционный акцент всего сооружения. Угадывается и его духовно-смысловая суть – гигантский восьмигранный столп, увенчанный шатром над «Святой Святых». Образ скинии, шатра, используемого в архитектуре, совершенно понятен [14, с. 37]. Господь «*распростер небеса, как тонкую ткань, и раскинул их, как шатер для жилья*» (Исаия 40:22). «Священно ополчаются четверочастнии люди, преходяще образом свидетельства скинии, крестообразными чинми прославляемии» (Канон на воздвижение честного и животворящего креста Господня. Песнь 4, тропарь 3).

Тема Иерусалимской святыни угадывается во многих православных церквях. Это и форма октагона, хорошо прочитываемая в апсиде перестроенного Борисо-Глебского храма в Новогрудке (также памятнике древнебелорусского зодчества XII века), в очертании апсиды и барабана Благовещенской церкви в Супрасле и др. Это и шатровые завершения как в упомянутых памятниках Гродно, так и в виленских церквях. Более того, Софийский собор в Полоцке также был увенчан шатром. По предположению А.И. Некрасова, именно из Беларуси впоследствии в Россию пришло шатровое зодчество [15, с. 247]. Октагональные формы и шатровые завершения белорусских церквей того времени стали знаменем прихода новой образной наполненности в православную архитектуру. Такие нововведения были вполне созвучны общестилевой направленности «страны замков», значительно расширяя композиционную палитру «белорусской готики».

Заключение. Условность и несовершенство графических материалов, на которых запечатлены образцы православного зодчества Беларуси XVI века, отсутствие прямых документальных доказательств не позволяют нам делать абсолютные и бесспорные выводы. Но важнейший фактор – общехристианские ценности, тождественность исторических, культурных и духовных процессов – дает нам основание ви-

деть в создании новых и перестройке существовавших белорусских храмов, и в первую очередь полоцких, знаковое событие. Эта перестройка была ничем иным, как уникальной попыткой приблизить к верующему «корабль спасения», артикулированный элементами храма Гроба Господня в Иерусалиме в соответствии с эсхатологическими настроениями эпохи. Возникла необходимость воссоздать модель Святой Земли в исконно православной богохранимой стране. Такая практика, как мы видим, была обычной для общехристианской традиции того времени. Это было и результатом стремления зримо, а не декларативно, утвердить свой приоритет в решении проблемы преемственности вселенского центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krautheimer, R. Introduction to an «Iconography of Medieval Architecture» / R. Krautheimer // Journal of the Institutes, 1942. С. 1 – 33. – (Цит. по: Вятчанина, Т.Н. О значении образца в древнерусской архитектуре / Т.Н. Вятчанина // АН. – 1984. – № 32.
2. Раппопорт, П.А. Русская архитектура X – XIII вв. / П.А. Раппопорт. – Л., 1982.
3. Лаппо, И.И. Полоцкая ревизия 1552 года / И.И. Лаппо. – М., 1905.
4. Хождение священноинока Варсонофия ко святому граду Иерусалиму в 1456 и 1461 гг. // Православный палестинский сборник. – СПб., 1896. – Т. XV, вып. 45.
5. Данилова, И.Е. О категории времени в живописи кватроченто / И.Е. Данилова // Искусство Средних веков и Возрождения. – М., 1984.
6. Хорошкевич, А.Л. Полоцкие грамоты XIII – начала XIV в. / А.Л. Хорошкевич. – М., 1985. – Т. V.
7. Хозеров, И.М. Полоцкое зодчество XI – XII вв. в свете новых исследований / И.М. Хозеров // Адраджэнне: Гіст. альманах. – Мінск, 1995. – Вып. 1.
8. Хождение архимандрита Аграфенья обители пресвятыя Богородицы, около 1370 года // Православный палестинский сборник. – СПб., 1896. – Т. XVI, вып. 48.
9. Попов, Г.В. Древнейший русский лицевой проскинитарий / Г.В. Попов // Иерусалим в русской культуре. – М., 1994.
10. Лихачев, Д.С. Новгород Великий / Д.С. Лихачев. – Л., 1949.
11. Рындина, А.В. Особенности сложения иконографии в древнерусской пластике «Гроб Господен» / А.В. Рындина // Древнерусское искусство. – М., 1968.
12. Пэрэгрынацыя, або Паломніцтва Ясна Асветленага Князя Ягамосці Мікалая Крыштофа Радзівіла ў Святую Зямлю // Кніга жыццй і хаджэнняў. – Мінск, 1994.
13. Лидов А.М. Небесный Иерусалим в восточнохристианской иконографии / А.М. Лидов // Иерусалим в русской культуре. – М., 1994.
14. Ильин, М.А. Русское шатровое зодчество / М.А. Ильин. – М., 1980.
15. Некрасов, А.И. Очерки по истории древнерусского зодчества XI – XII веков / А.И. Некрасов. – М., 1936.

Поступила 23.05.2012

THE HOLY LAND MODEL IN THE SACRED TOPOGRAPHY OF POLOTSK

G. LAVRETSKY

We consider the development of architecture in Polotsk as a vivid example of Byzantine, ancient Russian and Western traditions to create a Holy Land Model. Clear planning system, developed in the Polotsk during its heyday, was the basis for the development of a new shaped structure in the XV century. Comparison with historical sources and architectural structures showed that the same processes occurred in many Christian countries. General Christian values, the identity of the historical, cultural, and spiritual processes give us a reason to see the creation and reconstruction of existing Belarusian churches, and especially in Polotsk, a momentous event. No doubt, the role of Polotsk, the main economic and spiritual center, influenced the tendency to consider it an Orthodox Jerusalem.

УДК 726.71(476)

**АРХИТЕКТУРА КОСТЕЛОВ XVII – XIX ВЕКОВ:
ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕМНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПОЗИЦИИ****канд. архитектуры, доц. А.Н. КОЛОСОВСКАЯ**
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Архитектура католических костелов XVII – XIX веков является важной составляющей истории Беларуси, отражает уникальность отечественной культуры и вызывает постоянный интерес в обществе. В городах современной Беларуси имеется большое количество культовых сооружений, особое место среди которых принадлежит костелам католической церкви. Костелы в XVII – XIX века возводились преимущественно в западных городах, отличались масштабностью строительства и сложностью объемно-пространственной композиции зданий. В результате анализа и оценки архитектуры костелов Беларуси XVII – XIX веков были выявлены их особенности и в соответствии с объемно-пространственной композицией зданий проведена классификация. Анализ архитектуры культовых сооружений необходим для привлечения результатов исследовательской работы при возведении новых объектов, реконструкции и адаптации существующих строений в новой градостроительной среде. В процессе модернизации исторических центров городов важно обеспечить сохранность культовых сооружений, безусловно, возникает необходимость в точных исторических сведениях и подобных аналитических исследованиях, ориентированных на потребности органов охраны историко-культурных ценностей и управления архитектурной и градостроительной деятельностью, проектировщиков.

Введение. Ряд вопросов архитектуры католических костелов XVII – XIX веков получил освещение в исследованиях отечественных и зарубежных специалистов: по вопросам развития стилей зданий монастырских храмов (Т.В. Габрусь, Ю.А. Егоров, А.Н. Кулагин, А.И. Локотко, Е.Д. Квитницкая, Ю.В. Чантурия и др.); по вопросам стилей и деятельности европейских и местных зодчих в трудах российских, польских, литовских исследователей архитектуры (Н.Ф. Высоцкая, В.И. Кудряшов, Б.А. Лазуко, A.J. Baranowski, J. Kowalczyk, St. Lorentz и др.).

Анализ научной литературы по теме обнаруживает необходимость проведения дополнительных исследований по вопросам формообразования и композиции культовых зданий католической церкви. В работе использован системный подход, базирующийся на анализе наиболее характерных примеров архитектуры костелов, возведенных на территории Беларуси в XVII – XIX веках на общем историко-культурном фоне, включающий методы: *историко-системный, историко-генетический, историко-сравнительный, историко-типологический и герменевтический метод трактовки архитектурных форм.*

Основная часть. На территории Беларуси существовал ряд католических монашеских орденов: 18 мужских (иезуиты, бернардинцы, доминиканцы, францисканцы, кармелиты, бенедиктинцы, каноники латеранские, цистерцианцы, миссионеры, пиары, рохиты, мариане, картузы, августинцы, камедулы, реформаты, тринитари, бонифратры) и 7 женских (доминиканки, бернардинки, кармелитки, цистерцианки, мариавитки, бригитки, бенедиктинки). В рассматриваемый период существовал и орден базилиан греко-католической церкви, имевший мужскую и женскую ветви.

С конца XVI века в архитектуре костелов воплощалось барокко, которое постепенно сменилось со второй половины XVIII века классицизмом. Барокко свойственны контрастность, напряженность, динамичность образов, стремление к величию и пышности, к совмещению реальности и иллюзии. Стиль барокко позволил выявить специфику архитектуры монашеских орденов и в то же время сформировать определенные композиционные схемы, подчиненные единому замыслу.

В Беларуси барокко имеет несколько иную трактовку: в отличие от западноевропейского стиля, архитектура костелов близка к традиционным монументальным формам зодчества. Распространению стиля барокко в культуре Беларуси способствовал несвижский князь Николай Криштоф Сиротка – инициатор перестройки г. Несвижа, начатой в 1586 году при участии ордена иезуитов – Societas Jesu (SJ). На формирование архитектуры костелов Беларуси XVII – XIX веков несомненно влияние итальянской барочной архитектуры, в которой Рим, Турин и Неаполь занимали главенствующую позицию в художественных событиях по всей Европе того времени. Архитекторы иезуиты привнесли в зодчество Беларуси новую римскую базиликальную систему, схему главного фасада, большой ордер. Каждая постройка имела авторскую интерпретацию от римского прототипа, в том числе и костел Божьего тела в Несвиже, являющийся первым архитектурным произведением барокко (1593 г., архитектор Я.М. Бернардини).

С середины XVII века получил широкое развитие барочный декор, отмечается стремление к выделению отдельных частей здания. Одно из направлений культового зодчества середины XVIII века полу-

чает в литературе название «виленское барокко». К зданиям этого направления в Беларуси относятся костел и монастырь кармелитов в Глубоком (1735 г., архитектор Я.К. Глаубиц), костел и монастырь францисканцев в Ивенце (основан в 1702 г.) и др. Здания такого типа характеризует усиленная утонченность пропорций, пластичность фасадов. Отличительным для стиля стало появление на главном фасаде многоуровневых башен с вытянутыми пропорциями, по ярусам уменьшенных в сечении, и фигурных аттиковых фронтонов. Художественный образ всего сооружения строился на контрасте упрощенной архитектуры монастыря и насыщенного декором фасада храма.

В период зрелого и позднего барокко (вторая половина XVII – 80-е годы XVIII века) использовались устремленные вверх формы, красота определялась стройностью высотной композиции, членением фасадов, архитектурные детали которых становятся все более пластичные (костел монастырь цистерцианцев в Вистичах, 1678 г.). Архитектура зданий храмов периода барокко характеризовалась разнообразием объемно-пространственных и планировочных решений, основанных на традициях базиликального, зального и центрического типа храма.

Развитие европейской инженерно-строительной науки XVII – XVIII веков привело к решению таких строительных задач, как возведение сложных купольных и сводчатых систем в кирпиче и естественном камне. Обилие лепных позолоченных украшений, фигурная скульптура, живописные композиции на сводах и куполах стали характерны для интерьеров монументальных храмов. С конца XVIII века определяются новые принципы проектирования, основанные на идеях классицизма. Основные принципы классицизма – строгая симметрия планов и объемов, простота и геометрическая четкость очертаний, подчинение второстепенного главному, строгая система пропорционирования и модульность – отразились в архитектуре.

Широко применявшийся монашескими орденами базиликально-купольный тип храма в период классицизма не получил распространения, на его смену приходит центрический и зальный типы, последний становится наиболее распространенным объемно-планировочным решением костела.

По схематическим признакам построения объемно-пространственной композиции храмов монашеских орденов можно выделить основные типы:

А. ЗАЛЬНЫЕ

1. ОДНОНЕФНЫЕ

1.1. Безбашенные: бернардинцев в Пинске (1786), цистерцианок в Мозыре (1743 – 1745), каноников латеранских в Крамянице (1617 – 1620), бернардинцев в Воложине, классицизм (1816), кармелитов в Лиде, барокко, классицизм (2-я пол. XVIII в.);

с трансептом – каноников латеранских в Слониме (осн. 1650 г.).

1.2. Однобашенные: августинцев в Бресте (1683 – 1686), бернардинцев в Слониме (1639 – 1645), бенедиктинок в Несвиже (1590 – 1596), бернардинок в Гродно (1621), доминиканцев в Заславле (XVII в.), доминиканцев в Ружанах (заложен в 1617 г., пристройка каплиц 1768 – 1787), тринитариев в Кривичах (1776);

с трансептом – Карла Борромея в Пинске (1770 – 1782).

1.3. Двухбашенные: бернардинок в Бресте (1750), бригиток в Гродно (1634 – 1642), августинцев в Михалишках (1653), каноников регулярных в Быстрице (1760), бенедиктинок в Минске (1780-е), бенедиктинок в Слониме, классицизм (1801), бернардинцев в Полоцке (1758), доминиканцев в Клецке (1683), доминиканцев в Ушачах (1787), кармелитов в Засвирье (1713 – 1714), пиаров в Лужках (1744 – 1756), доминиканцев в Княжицах (1681).

2. ЦЕНТРИЧНЫЕ

с куполом – тринитариев в Бресте (с 1738 г.), кармелитов в Мяделе (1752/3);

с башней над средокрестием – бригиток в Бресте (1751);

с развитым нефом – пиаров в Щучине классицизм (1829), бернардинцев в Бенице (1701 – 1704);

Б. БАЗИЛИКАЛЬНЫЕ

1. ДВУХНЕФНЫЕ

двухбашенный с трансептом: иезуитов в Мстиславле (1730 – 1738, в 1842 году достроен деревянный купол, который не сохранился).

2. ТРЕХНЕФНЫЕ

2.1. Безбашенные: францисканцев в Гольшанах (1618), бернардинцев в Минске (с 1676 г.), бернардинцев в Слуцке (1739), доминиканцев в Деречине (1690), доминиканцев в Зембине барокко, классицизм (1790 – 1809), доминиканцев в Минске (1622), доминиканцев в Новогрудке (1751), доминиканцев в Островце (1785 – 1787), доминиканцев в Полоцке, классицизм (1774 – 1804), иезуитов в Рясно, классицизм (1812 – 1818), кармелитов в Гродно (1738 – 1765), францисканцев в Гриневичах (1792), францисканцев в Новогрудке (1780), цистерцианцев в Витичах (1678);

с сигнатуркой – бернардинцев в Бресте (с 1623 г.);

с башней-колокольней у главного фасада – бернардинцев в Гродно (с 1602 года), францисканцев в Гродно (с 1635 года);

с трансептом – кармелитов в Большой Берестовице (с 1615 года);

с куполом – доминиканцев в Несвиже (1690);

крестово-купольные – иезуитский в Несвиже (1587 – 1593).

2.2. Однобашенные:

с башней у главного фасада – бернардинцев в Друе (1643), бернардинцев в Несвиже (основан в 1598 году);

с башней у алтарного фасада и сигнатуркой – картезианцев в Березе (1648 – 1689).

2.3. Двухбашенные: бернардинцев в Витебске (1737 – 55), бернардинок в Минске (с 1642 г.), бернардинцев в Ивье (1600), бернардинцев в Мозыре (1760 – 1775), доминиканцев в Гродно (1630-е), доминиканцев в Волинцах (Забелах) (1749 – 1766), доминиканцев в Слониме (основан в 1680 г.), доминиканцев в Столбцах (1621 – 1640), доминиканцев в Улле (основан в 1669 г.), иезуитов в Юровичах (1717 – 1746), иезуитов в Бобруйске (1747), иезуитов в Кривошине (около 1740 г.), иезуитов в Минске (1700 – 1710), иезуитов в Могилеве (1699 – 1725), кармелитов в Могилеве (1738 – 1752, в 1788 году перестройка в классицизме), кармелитов в Мстиславле (1746 – 1750), храм командории мальтийских кавалеров в Столовичах (1740 – 1746, в 1868 году перестроен в 5-купольный, купола не сохранились), миссионеров в Смилевичах (1767), францисканцев в Пинске (с 1510 г.), францисканцев в Новоградке (1766 – 1805, в 1809 году снесены башни);

с куполом – кармелитов в Чаусах (основан в 1651/3);

с трансептом – бернардинцев в Селище (1726), доминиканцев в Друе (1765 – 1773), доминиканцев в Дуниловичах (1769 – 1773), доминиканцев в Смолянах (1678 – 1680), иезуитов в Бресте (1656 – 1713), иезуитов в Лучай (1766 – 1776), францисканцев в Ивенце (1702 – 1705), иезуитов в Пинске (1631 – 1635) (позднее пристроен купол);

крестово-купольные – бернардинцев в Будславе (1783), иезуитов в Полоцке (1745), иезуитов в Витебске (1716 – 1751), иезуитский в Гродно (с 1647 г.), кармелитов в Бельничках (1742 – 1763).

2.4. Четырехбашенный: кармелитов в Глубоком (1639 – 1654, в 1895 году достроен деревянный купол, который не сохранился).

Содержанием теории архитектурной композиции в целом является «исследование произведения архитектуры в его единстве и общие закономерности формообразования» [1, с. 7]. Смолина Н.И. определяет симметрию как «состояние покоя», асимметрию, напротив, как «зрительное движение». Важнейшей из закономерностей хорошо организованной объемно-пространственной структуры является органичность связей между отдельными элементами или частями структуры. Строение композиции характеризуется наличием главных и второстепенных элементов. Условием целостности и соподчиненности элементов объемно-пространственной структуры, ее гармоничности является ее общая упорядоченность, проявляющаяся как принцип строения [2, с. 62 – 75].

Учитывая особенности формообразования и приемы объемно-пространственной организации костелов XVII – XIX веков, установлено, что их архитектура отвечает следующим композиционным принципам: *центричности, трехчастности, взаимосвязи, соразмерности, подобия, сопоставления, согласованности, единства и иерархичности, покадровости и сбалансированности.*

Составные части храма представляют собой одновременно вертикальную и горизонтальную композиции, где композиционная взаимосвязь основывалась на иерархичности, определяющей динамику уровней в соответствии со значимостью каждой.

Здания храмов в застройке городов и прочих поселений доминировали не только масштабами, но и вертикальной организацией, характерными пластичными формами. Размеры храмов при компактной схеме плана были небольшими относительно европейских прототипов. Объемно-пространственная композиция храмового здания решалась сочетанием горизонтали объема корабля, вертикали башен (или башни), и если это крестово-купольная базилика, то и барабана с куполом над средокрестием (Гродно, костел и монастырь иезуитов). Симметричная двухбашенная и однобашенная композиции или асимметричная однобашенная композиция главных фасадов храмов решались, основываясь на принципе симметрии, где центральная часть, акцентировалась порталом, окном по центральной оси, выделялась, как и на боковых фасадах, пилястрами или ступенчатыми контрфорсами. Характерным является завершение фасада треугольным фронтоном, который при двухбашенной композиционной схеме выступает объединяющим композиционным элементом (Минск, костел и монастырь бернардинок). Асимметричный главный однобашенный фасад также завершался треугольным фронтоном, сопряженным с гранью башни (Гродно, костел и монастырь бернардинцев и францисканцев). Общий строй элементов фасада подчеркивал вертикальное направление и основывался на вытянутых формах, что визуально усиливает развитие храма вверх.

На боковых фасадах храмов частым и объединяющим композиционным приемом являлось чередование ступенчатых пилястр и прямоугольных или арочных оконных проемов в простенках. В компо-

зиционном решении следует отметить здания храмов с многоуровневыми башнями, по ярусам уменьшенными в сечении (Будслав, костел бернардинцев).

Интерьеры храмов решались по традиционно-конфессиональной схеме организации литургического пространства. В большинстве рассматриваемых храмов организация внутреннего пространства представляет собой симметричную композицию, которая основывается на продольном развитии плана и подчиняется трехчастной структуре: входная часть (нартекс), корабль (неф), алтарная часть (пресбитерий). Как правило, в храме помимо главного алтаря устраивались два и более боковых алтарей. Хоры над входной частью использовались как место для певчих и размещения органа. Сакристии – два симметрично расположенных помещения относительно пресбитерия – размещались внутри храма. Пресбитерий в плане в ряде случаев выходил за границы основного объема, образуя многоугольник или полукруг, соответственно, в объеме этот планировочный прием решался выходящей за пределы корабля граненой или полуцилиндрической апсидой.

Наличие трансепта в храме придавали плану в разрезе на уровне выше боковых нефов вид латинского креста в костелах и греческого (равноконечного) в церквях. Присущая сакральному зодчеству Византии концентрическая форма и 2-осевая симметрия композиции, воплощенные в крестово-купольном храме, получили особую трактовку в греко-католических храмах Беларуси, в которых встречается и ориентация главного фасада на юг, алтаря – на север.

Убранство интерьеров в целом соотносится со стилистическим решением здания храма. В ряде случаев известны расхождения в стилизовании интерьера и экстерьера, что связано в первую очередь с множеством одновременных перестроек (Гродненский костел и монастырь бернардинцев возведен в XVI – XVIII веках, в нем соединены приемы и формы готики, ренессанса и барокко).

Безусловно, архитектурные формы вырабатывались в зависимости от тех или иных применявшихся в строительстве материалов и конструкций. На формирование архитектуры костелов наряду с доминирующим мировоззрением, идеологией, социально-экономическими факторами, природными условиями влиял технический уровень и методы строительной деятельности, позволившие наиболее ярко воплотиться стилю барокко, когда каменная стена приобретала вид волнообразной структуры.

Заключение. Архитектура католических костелов Беларуси XVII – XIX веков обусловлена историческими путями развития региона и местными традициями зодчества, вырабатывалась в соответствии с уставом каждого монашеского ордена и в то же время отвечала определенному художественному направлению эпохи, будь то барокко или классицизм. Все это отразилось на определенном единообразии и в рамках одного ордена, и в рамках стиля, что способствовало применению определенных объемно-пространственных композиций.

По *схематическим признакам построения* плана костелы составляют две основные группы: трехнефные (базиликальные) и однонефные (иногда со встроенными и пристроенными капеллами); по композиции главного фасада на три вида: одно- двух- и безбашенные.

Купольные базиликальные костелы чаще других встречаются в строительной практике иезуитов (Несвиж, Гродно). Необходимо выделить также четырехбашенные композиции (кармелитов в Глубоком) и центричные постройки (Волчин, Мядель), которые редки в культовом зодчестве Беларуси.

Наиболее активное строительство костелов велось в западных городах, где храмы монастырей занимали центральное место в структуре площади, становясь объектами-доминантами. Рассматриваемый период строительства монастырей характеризовался разнообразием стилистических решений, в объемно-пространственных решениях допускалось разнообразие композиционных схем, заимствованных из аналогов европейской архитектуры. Возведение храмовых зданий западной ветви христианства привнесло в культовую архитектуру Беларуси западноевропейские мотивы, способствовало обогащению стилистического, объемно-пространственного, конструктивного решений.

Сегодня в архитектурной теории и практике накоплен существенный опыт исследований и обобщений отдельных сторон архитектуры края, который несомненно требует более углубленного изучения для составления более полной картины культовой архитектуры Беларуси XVII – XIX веков.

Исследование католических костелов и анализ особенностей объемно-пространственной композиции объектов архитектуры монашеских орденов представляет научно-практическую ценность в процессе современной практики реконструкции, а также строительства новых культовых объектов, при градостроительных преобразованиях исторических центров городов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иконников, А.В. Основы архитектурной композиции / А.В. Иконников, Г.П. Степанов. – М.: Искусство, 1971. – 224 с.
2. Смолина, Н.И. Традиции симметрии в архитектуре / Н.И. Смолина. – М.: Стройиздат, 1990. – 343 с.

3. Барока ў беларускай культуры і мастацтве / пад рэд. В.Ф. Шматава. – Мінск: Беларус. навука, 1998. – 304 с.
4. Страчаная спадчына / Т.В. Гарбусь (уклад.) [і інш.]. – Мінск: Полымя, 1998. – 352 с.
5. Егоров, Ю.А. Градостроительство Белоруссии / Ю.А. Егоров. – М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архит., 1954. – 282 с.
6. Хольц, Л. История христианского монашества / Л. Хольц. – СПб.: Святой крест, 1993. – 425 с.
7. Католическая энциклопедия: в 4 т.; редкол.: О. Григорий Цёрох OFM Conv (председ.) [и др.]. – М.: Изд-во Францисканцев, 2002. – Т. 1: А – З. – 1906 с.
8. Новейший философский словарь / сост. А.А. Грицанов. – Минск: Изд. В.М. Сакун, 1998. – 896 с.
9. Чантурия, В.А. История архитектуры Белоруссии: Дооктябрьский период / В.А. Чантурия. – 3-е изд. – Минск: Выш. шк., 1985. – 296 с.
10. Энциклопедический словарь: в 86 т. / под ред. И.Е. Андреевского. – СПб.: Фирма «Полрадис»: АОТ «Иван Федоров», 1993. Т. 1 – 86. – (Репринт. воспроизв. изд. Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона, 1890).
11. Квитницкая, Е.Д. Монастыри XVIII в. с безбашенными храмами в Белоруссии / Е.Д. Квитницкая // АН. – М., 1985. – № 33. – С. 94 – 102.
12. Квитницкая Е.Д. Монастыри Бреста XVII – XVIII вв. / Е.Д. Квитницкая // АН. – М., 1979. – № 27. – С. 108 – 121.
13. Беларусы: у 8 т. / Ін-т мастацтвазнаўства, этнаграфіі і фальклору; рэдкал.: В.К. Бандарчык [і інш.]. – Мінск: Тэхналогія, 1997. – Т. 2: Дойлідства / А.І. Лакотка. – 1997. – 391 с.
14. Высоцкая, Н.Ф. Пластыка Беларусі XII – XVIII стст. / аўтар тэксту і склад. Н.Ф. Высоцкая. – Мінск: Беларусь, 1983. – 230 с.
15. Лазука, Б.А. Беларускае барока: Гіст.-тэарэт. прабл. стылю / Б.А. Лазука. – Мінск: Беларусь, 2001. – 144 с.
16. Baranowski, A.J. Nurty, fazy i centre barokowej architektury sakralnej w Wielkim Księstwie Litewskim / A.J. Baranowski // BHS. XLVI. – Warszawa, 1984. – Nr. 4. – S. 371 – 392.
17. Kowalczyk, J. Późnobarokowa architektura Wilna i jej europejskie związki / J. Kowalczyk // BHS. R. LV. – Warszawa, 1993. – Nr. 2/3. – S. 169 – 195.
18. Lorentz, St. Album wileńskie / St. Lorentz. – Warszawa: Państw. Inst. Wydawniczy, 1986. – 237 s.

Поступила 27.04.2012

ARCHITECTURE OF CHURCHES XVII – XIX CENTURIES: FEATURES OF A VOLUME-SPATIAL COMPOSITION

A. KOLOSOVSKAYA

The architecture of Catholic churches XVII – XIX centuries is an important making history of Belarus, reflects uniqueness of domestic culture, and causes constant interest in a society. In cities of modern Belarus there is a considerable quantity of cult constructions the special place among which belongs to churches of Catholic Church. Churches XVII – XIX centuries were erected mainly in the western cities, it is necessary to note scale of building and complexity of a volume-spatial composition of buildings. As a result of the analysis and an estimation of architecture of churches of Belarus XVII – XIX centuries their features have been revealed and according to a volume-spatial composition of buildings classification is made. The analysis of architecture of cult constructions is necessary for attraction of results of research work at erection of new objects, reconstruction and adaptation of existing structures in the new town-planning environment. In the course of modernization of the historical centres of cities it is important to provide preservation of a cult heritage. Exact historical data and the similar analytical researches made for the organizations on protection of historical and cultural values and management by architectural and town-planning activity, designers are necessary.

УДК 72.03

ПЛАНИРОВКА И ЗАСТРОЙКА ГЛАВНОЙ ПЛОЩАДИ ПОЛОЦКА В КОНЦЕ XVIII – НАЧАЛЕ XIX ВЕКА

канд. техн. наук, доц. **Р.М. ПЛАТОНОВА, М.А. ПЛАТОНОВА**
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены вопросы планировки застройки главной площади Полоцка в конце XVIII – начале XIX века. На основе анализа археологических раскопок, проведенных на территории Полоцка, имеющихся реконструируемых планировочных решений, изучения литературных источников установлено, что в указанный период застройка города проводилась по проекту регулярной перепланировки архитектора И. Зигфридена. В результате реконструкции первоначальные, опорные, барочные элементы, размещавшиеся в ортогональной системе планировки XVI – XVII веков, посредством классицистической застройки объединились в законченное пространственное целое. В основу идейного содержания ансамбля главной площади легло противопоставление и одновременно единство культового католического начала, дополненного его просветительской деятельностью, и административно-политической власти, олицетворявшей историческую значимость новой государственности. Художественные достоинства и богатство ансамбля позволяют причислить его к лучшим произведениям градостроительного искусства Беларуси.

Введение. Полоцк (862 г.) – один из наиболее древних городов Республики Беларусь. Город расположен на реке Западная Двина, при впадении в нее реки Полоты, и является важным экономическим и культурным центром Беларуси. Полоцк имеет богатую историю. Важным событием в жизни города явилось его вхождение в конце XVIII века в состав Российского государства в результате первого и второго разделов Речи Посполитой, что способствовало укреплению связей Полоцка с городами России. Его градостроительное искусство оказалось тесно связанным с русским.

В конце XVIII – начале XIX века происходят значительные в градостроительном отношении изменения городов Беларуси, которые совпали с началом грандиозных работ по переустройству городов Российской империи. При этом сохранялась белорусская специфика. (Белорусские города того времени были более похожи на западноевропейские, чем русские).

В Полоцке к этому периоду было значительное количество каменных домов. Имела место прямоугольная сетка улиц, которая была лишь продолжением главной площади в восточном и западном направлениях и ограничивалась линиями земляных укреплений.

Основная часть. Особый интерес среди архитектурных памятников Полоцка конца XVIII – начала XIX века представляет планировка и застройка главной площади. Главная площадь города была совмещена с существующей площадью перед монументальными зданиями иезуитской академии и костела святого Стефана. Эти постройки вскоре были преобразованы в кадетский корпус и кафедральный Николаевский собор (рис. 1), а площадь названа Корпусной [1; 2].



Рис. 1. Николаевский собор и фасад кадетского корпуса
(при иезуитах – костел святого Стефана и здания иезуитского коллегияума)

Костел Святого Стефана – двухбашенная трехнефная базилика. Храм был спроектирован по оси симметрии центральной площади, замыкая перспективу главной Витебской улицы. Имея традиционный

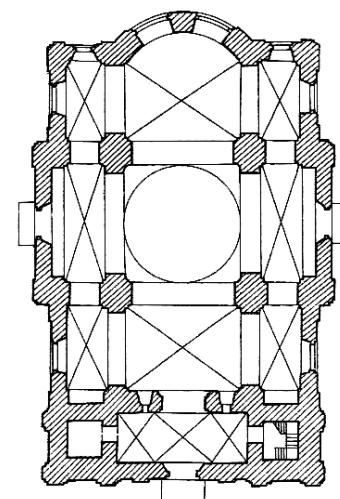
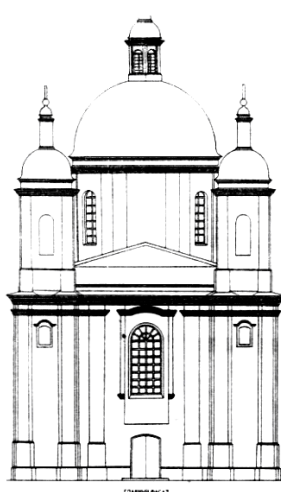
базиликальный план, он венчался куполом на высоком барабане. Внешнее архитектурное оформление храма было сдержанным. Однако размеры сооружения (24 × 53 м в плане) и строгие пропорции придавали храму выразительность, устремленность ввысь. Высота храма равнялась его длине (53 м). Степень декоративной насыщенности увеличивается в направлении кверху вместе с уменьшением размеров архитектурных элементов. Благодаря этому храм не перенасыщен украшениями, ему присущи стройность и вертикализм, характерные для белорусского (виленского) барокко.

Проект перedelки иезуитского костёла датирован 1831 годом. Он предусматривал сохранение примыкавшего к храму монастырского корпуса, устройство одного престола и уничтожение кафедры в интерьере. Производилась замена храмовых икон, церковной утвари. Некоторые полотна церковной живописи (в частности, произведение художника середины XVII века Сальватора Розы) сохранились и после реконструкции. Освящение Свято-Николаевского собора в Полоцке состоялось 5 февраля 1833 года. В 1839 году собор был преобразован в церковь Полоцкого кадетского корпуса, а с 1865 года – в церковь Полоцкой военной гимназии. По просьбе жителей в 1875 году храм снова стал городским собором с приписанной к нему Софийской церковью¹.

Левее Николаевского собора и кадетского корпуса расположена Екатерининская церковь, построенная в 1761 – 1779 годах по проекту архитектора Д. Кварнеги. Церковь входила в комплекс Богоявленского монастыря. Это крестовокупольный однонефный и одноапсидный храм с двумя башнями на главном фасаде. Над пересечением основного объема и транспта устроен высокий световой барабан со сферическим куполом. Стены, башни, барабан купола с прорезанными высокими оконными проемами с полуциркулярными завершениями и расчленены пилястрами. Интерьер храма двухсветный. Четыре массивных столба поддерживают барабан на парусах. Церковь является памятником архитектуры барокко с элементами классицизма (рис. 2) [1 – 3].



а)



б)

Рис. 2. Главный фасад (а) и план (б) Екатерининской церкви Богоявленского монастыря

В ансамбль площади вошли также различные «казенные» строения, которые придали ему новое содержание. Застройка типовыми зданиями ускорила процесс формирования нового центра и обеспечила стилистическое единство ансамбля. Южная часть центральной площади застраивалась по единому проекту. Планы зданий с северной стороны (рис. 3) и развертка одной из сторон площади дошла до нас в виде чертежа под названием «План с фасадами каменным домам» [1].

Полоцк с конца XVIII века приобретает статус центра Полоцкой губернии. С 1778 по 1796 год губернским архитектором здесь работает И. Зигфриден. Постройки, возводимые зодчим в рамках государственной программы переустройства городов в империи, следует отнести к барочно-классическому направлению. О близости с классицизмом говорит застройка регулярной площади двухэтажными административными зданиями с плоско решенными фасадами. Однако иезуитский костел на западной стороне придавал не свойственную классицизму динамику, что вносило в стилистику черты барокко (рис. 4). В зигфриденовской застройке был использован проект почтового дома архитектора И.Е. Старова (рис. 5). Проект Старова профранцузской стилистики был использован в качестве составного элемента домов губернского магистрата, верхней и нижней расправы, соединенных филленчатыми оградами и воротами с

¹ Спустя многие годы, в январе 1964 года, храм был взорван, а на его месте построен многоквартирный жилой дом.

домом губернатора (на южной стороне), а также домов коменданта и земского суда, также соединенных филиченчатыми оградами и воротами с домом вице-губернатора (на северной стороне).

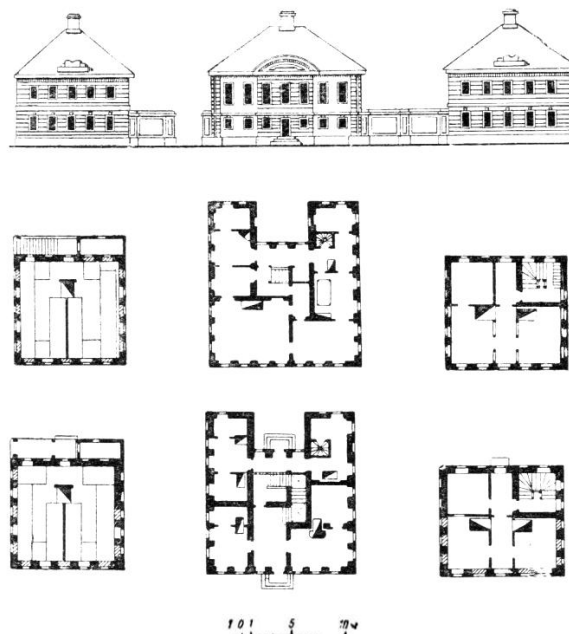


Рис. 3. Планы и фасады «казенных зданий» в Полоцке

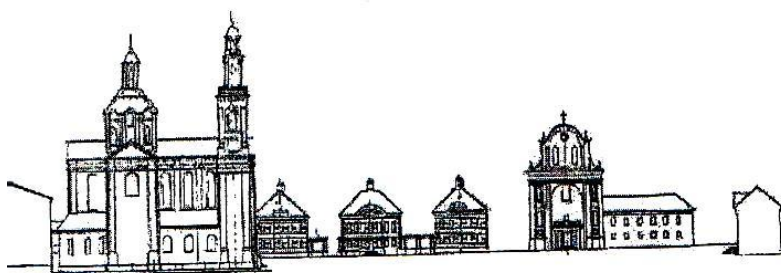


Рис. 4. Главная площадь Полоцка (конец XVIII в.). Вид с северной стороны

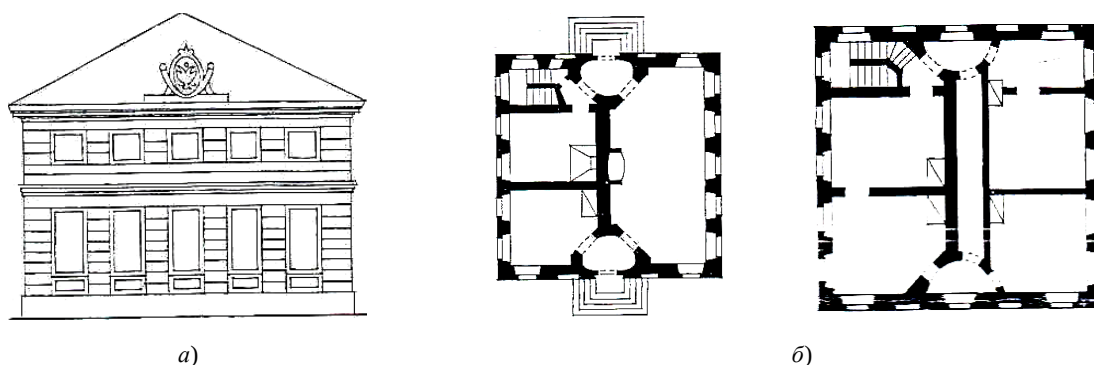


Рис. 5. Проект почтового дома для строительства на белорусских землях (архитектор И.Е. Старов (1772):
а – главный фасад; б – планы

Комплексы зданий губернатора и домом вице-губернатора, построенные в 1784 году, располагались на противоположных сторонах друг против друга, что отражено на схеме плана главной площади (рис. 6) [1; 4]. Комплексы состояли из центрального, большого по объему, двухэтажного корпуса с выделенной рустованным ризалитом и украшенной полуциркульным фронтоном средней частью и двух квадратных в плане корпусов, имеющих рустованные фасады и небольшие квадратные окна второго этажа. Корпуса соединялись капитальными заборами с воротами, зрительно объединявшими здания. Как

было сказано выше, боковые дома были выполнены по проекту почтового дома архитектора И.Е. Старова. Оба комплекса имеют одинаковые фасады и различаются конфигурацией плана и планировкой центральных корпусов.



Рис. 6. Схема плана главной площади Полоцка в 1786 году:

- 1 – иезуитский коллегиум и костел; 2 – доминиканский монастырь;
 3 – 13 – дома: 3 – коменданта; 4 – вице-губернатора; 5 – уездного и нижнего земского судов;
 6 – гражданской и уголовной палаты с верхним земским судом; 7 – наместнического правления, казенной палаты с экспедициями, совместного суда, приказа общественного призрения и уездного казначейства;
 8 – полиции и гауптвахты; 9 – генерал-губернатора; 10 – верхней и нижней расправы;
 11 – губернатора; 12 – губернского магистрата; 13 – казенной аптеки

К настоящему времени ансамбль утрачен, остались лишь пять зданий в перестроенном виде.

Изменения, произошедшие в архитектурном облике ансамбля, рассмотрим на примере трех зданий: губернского магистрата, дома губернатора, верхней и нижней расправы.

Протяженность фасада группы трех зданий (60 м) составляла половину ширины площади. Высота же административных зданий до верха кровли – 13,5 м, что также равнялось длине боковых домов комплекса (в крайних постройках длина фасада равнялась его высоте до верха кровли). Высота же кровли составляла 5 м. Единству ансамбля способствовал *лучковый фронтон*, первоначально украшавший портал иезуитского костела и повторенный на фасадах центральных из трех административных зданий. Горизонтальными элементами, зрительно объединявшими рядовые здания площади, служили *карнизы* над первыми этажами дома губернатора, составившие единое целое с карнизом по верху ограды. Об использовании других архитектурных форм в зданиях можно судить на основании схемы использования прямого подоби

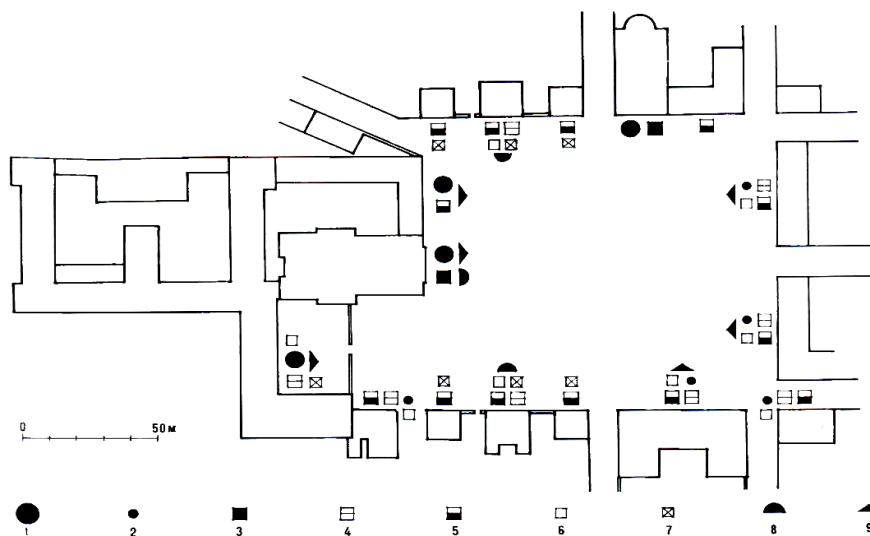


Рис. 7. Схема использования прямого подоби архитектурных форм в ансамбле площади в последней четверти XVIII века:

- 1 – большой ордер; 2 – поэтажные пилястры; 3 – портал; 4 – двухъярусные композиции фасада;
 5 – двухэтажный объем; 6 – наличники; 7 – руст; 8 – лучковый фронтон; 9 – треугольный фронтон

В середине XIX века ансамбль был перестроен. Группы из трех общественных зданий утратили осевые акценты, которые раньше образовывались плоским ризалитом и лучковым фронтоном среднего дома, их фасады лишились рустовки и стали почти одинаковыми. Окна приобрели рельефные наличники, кровли были понижены. Подобные преобразования произошли с группой домов на северной стороне, что видно на продольном разрезе ансамбля (рис. 8) [1; 4; 5]. Группа из трех зданий претерпела значительные изменения (рис. 9). Также изменилось и назначение административных зданий, на что указывает план центральной площади Полоцка в середине XIX века, представленный на рисунке 10.



Рис. 8. Полоцк. Продольный разрез ансамбля площади в середине XIX века. Вид с северной стороны

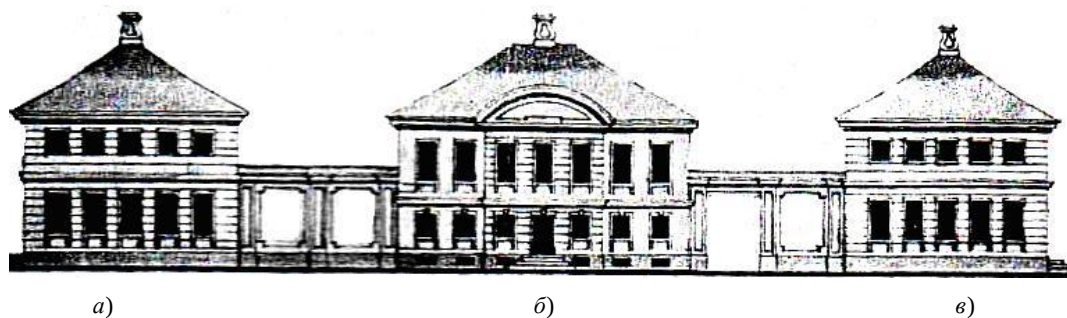


Рис. 9. Дома Полоцка (1784 г.):

а – губернского магистрата; б – губернатора; в – верхней и нижней расправы

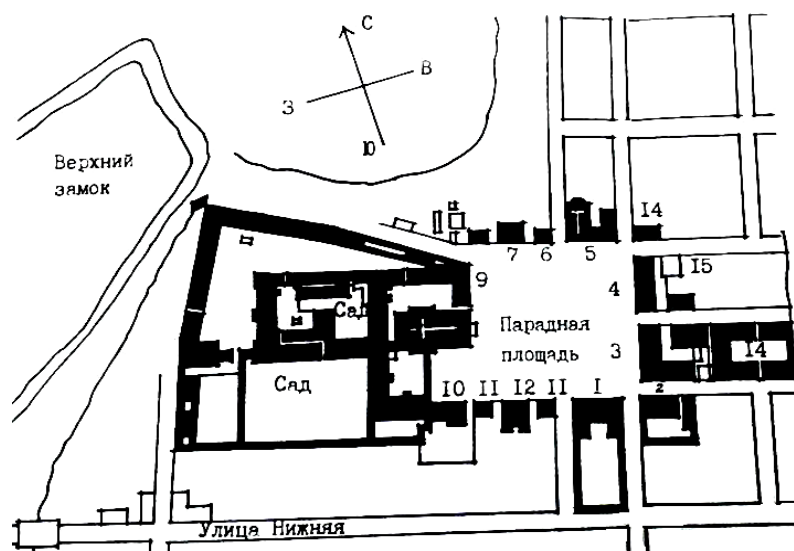


Рис. 10. План центральной площади Полоцка в середине XIX века:

- 1 – дворец, который предполагался к помещению всех присутственных мест; 2 – дом с флигелем;
3 – лицеальные классы; 4 – лицеальная зала; 5 – костел и кляштор ксендзов доминиканов; 6 – казенный дом;
7 – дом, занимаемый полицмейстером; 8 – дом, занимаемый Нижним Земским Судом; 9 – костел и монастырь;
10 – казенная аптека с подворьем; 11 – два дома ведомства Народного училища; 12 – дом Полоцкого народного училища;
13 – гостиные ряды; 14 – строения жителей города

В первом десятилетии XIX века, несмотря на то, что Полоцк стал уездным городом, его рост продолжался. В 1811 году в городе насчитывалось около 900 домов и 6320 жителей. Значительно расширилась застроенная территория города. Если в 70-х годах XVIII века Полоцк простирался в длину (вдоль течения Западной Двины) на 1,6 км, а в ширину – на 0,7 км (площадь около 112 га), то к 1812 году длина застроенной части равнялась 2,5 км, ширина 1,9 км, площадь составляла уже более 475 га.

Однако дальнейшее развитие его было временно прервано нашествием наполеоновских войск в июне 1812 года. Полоцк сильно пострадал от военных действий и почти четырехмесячной оккупации наполеоновскими войсками.

После освобождения в октябре 1812 года город представлял картину страшного разорения: много домов сгорело или было разрушено артиллерийскими снарядами. Город за время оккупации был разграблен, население его сильно уменьшилось: в 1817 году в нем насчитывалось только 3340 жителей. Война подорвала хозяйственную жизнь города. Восстановление разрушенного хозяйства шло медленно. Лишь к 1820 году число домов и жителей достигло довоенного уровня, в 1825 году в городе уже проживало 7066 человек, было построено 5,3 % каменных домов от общего количества зданий [4].

Примером гармоничного подхода, дальнейшего преемственного формирования застройки Полоцка служило размещение в 1850 году в центре Полоцка на Корпусной площади в «воспоминание Отечественной войны 1812 года» памятника героям Отечественной войны 1812 года (рис. 11). Общая высота сооружения составляла 23,77 м, вес – 110 тонн. Памятник выполнен в византийском стиле по проекту архитектора Антонио Адамини, итальянца швейцарского происхождения из Санкт-Петербурга².



Рис. 11. Памятник героям Отечественной войны 1812 года
(изображение начала XX века)

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

- в конце XVIII – начале XIX века застройка города проводилась по проекту регулярной перепланировки архитектора И. Зигфридена;
- в результате реконструкции первоначальные, опорные барочные элементы, размещавшиеся в ортогональной системе планировки XVI – XVII веков, посредством классицистической застройки объединились в законченное пространственное целое;
- в основу идейного содержания ансамбля главной площади легло противопоставление и одновременно единство культового католического начала, дополненного его просветительской деятельностью

² В начале 30-х годов XX столетия (1931 – 1932) памятник был снесён «на металл для нужд первой пятилетки». Однако в декабре 2009 года памятник героям Отечественной войны 1812 года был восстановлен, а в 2010 году освящен архиепископом Полоцким и Глубокским Феодосием.

стью и административно-политической властью, олицетворявшей историческую значимость новой государственности;

- художественные достоинства и богатство ансамбля позволяют причислить его к лучшим произведениям градостроительного искусства Беларуси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чантурия, Е.В. Градостроительное искусство Беларуси второй половины XVI – первой половины XIX века: Средневековое наследие. Ренессанс, барокко, классицизм / Ю.В. Чантурия. – Минск: Белорус. наука, 2005. – 375 с.
2. Лакотка, А.І. Архітэктура Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэксце: у чатырох тамах / А.І. Лакотка. – Мінск: Беларус. навука, 2007. – Т. 3. Кн. 1. Другая палова XVIII – першая палова XIX ст. – С. 171 – 451.
3. Чантурия, В.А. Атлас памятников архитектуры и мемориальных комплексов Белоруссии / В.А. Чантурия. – Минск: Выш. шк., 1988. – 100 с.
4. Хронология истории Полоцка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wikipedia.jrg/wiki>.
5. Егоров, Ю.А. Градостроительство Белоруссии / Ю.А. Егоров. – М.: Гос. изд-во по строительству и архитектуре, 1954. – 282 с.
6. Платонова, Р.М. Планировка и застройка Полоцка в конце 18 в. – начале 19 в. / Р.М. Платонова, М.А. Платонова, А.С. Давидович // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. науч. тр. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2011. – Вып. 3. – С. 140 – 145.

Поступила 18.05.2012

PLANNING AND BUILDING OF MAIN SQUARE IN POLOTSK IN 18th – THE BEGINNING OF 19th CENTURIES

R. PLATONAVA, M. PLATONAVA

The article deals with the questions of planning and building main square in Polotsk in 18th – the beginning of 19th centuries. Having analysed the findings of archeological excavations in Polotsk, planning concepts and other written sources of information, the authors of the article have come to the conclusion that the development of the main square of Polotsk of that period was carried out under the project of a regular redevelopment by I. Siegfrieden. The square ensemble can be ranked among the best works of town-planning art in Belarus thanks to its artistic and architectural merits.

УДК 726.71(476)(091)

ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ АРХИТЕКТУРНО-СТИЛИСТИЧЕСКОГО ОБЛИКА ПРОТЕСТАНТСКОГО ХРАМА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

Н.Г. ЛАВРЕЦКИЙ*(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Исследуются сложившиеся исторически характерные черты, свойственные протестантским архитектурным сооружениям на территории Беларуси. Представлен прогноз возможных путей их развития с последующим восстановлением архитектурной традиции. Рассматриваются 2 основные проблемы, которые возникли перед современной белорусской культовой архитектурой протестантизма. Одна из его характерных черт – лаконичность фасадов. Типичной формой протестантского храма является однонефный протяженный объем с входом через башню – главный фасад. Показано, что эти архитектурные приемы были присущи не только протестантской архитектуре, но именно в ней они получили наиболее широкое распространение.

Введение. Конфессиональная ситуация Беларуси уникальна нехарактерным для европейской страны со сложившимися религиозными традициями сочетанием христианских деноминаций, относящихся друг к другу с большой степенью взаимной терпимости.

Несмотря на заявляемое главенство православной церкви, католицизм и протестантизм также являются весьма распространенными в нашей стране. Когда в сложившейся среде появляется новый элемент, независимо от того, принимает его среда или отторгает, он несомненно оказывает свое влияние на среду. За всю короткую историю Реформации в Беларуси строительство протестантских храмов повлияло на храмовую архитектуру в целом.

Необходимо отметить тот факт, что основы образной концепции протестантских храмов (предельная простота архитектурно-пластического решения, организация внутреннего пространства с учетом максимальной концентрации на проповеди и др.) можно видеть на разных исторических этапах и в православной, и в католической архитектуре.

Основная часть. Протестантизм как ветвь христианства имеет на территории Беларуси определенные сложившиеся исторически традиции. С XVII века на волне общеевропейской популярности Реформации в Речи Посполитой строились протестантские храмы и развивались прореформационные настроения в среде элиты и зажиточных слоев населения. К протестантам относили себя подавляющее большинство магнатории, что заставляло считаться с их мнением и интересами. Когда Великое княжество Литовское подписало унию со Швецией в Кейданах в 1655 году, парламент Литвы состоял из большинства лютеран и лишь двоих православных. Реформаторское движение в ВКЛ было тесно связано с гуманистической культурой и реформаторскими событиями на западе Европы. Политическая элита Великого княжества с целью укрепления политического самосознания нации в XVI веке сделала ставку на Реформацию, пытаясь преодолеть таким образом влияние католической Польши и православного Московского княжества. Самобытный путь развития ВКЛ приостановила война, когда в 1563 году войсками Ивана Грозного был захвачен и разорен г. Полоцк. Великое княжество Литовское было вынуждено обратиться за помощью к Польше. Начались переговоры об объединении ВКЛ и Польши в единое государство, результатом которых стало подписание в 1569 году Люблинской Унии. Это привело к переходу части влиятельных деятелей ВКЛ в католичество [1]. Как это ни парадоксально, строительство собственно протестантских храмов с выявленной конфессиональной программой началось во времена, когда реформационное движение перешло в оппозицию к государственной идеологии, что можно наблюдать на примере немногочисленных уцелевших каменных кальвинских сборов, зафиксированных историческими источниками [2].

Позже, в результате разделов Речи Посполитой территория Беларуси оказалась в составе Российской Империи и все ветви христианства, кроме православия, были подвержены гонениям – в этот период большинство протестантских храмов были перестроены в православные. А во время существования БССР в составе СССР доимперская история Беларуси попала под запрет, и под влиянием воинствующего советского атеизма большинство памятников культовой архитектуры пришли в негодность, были уничтожены либо переоборудованы в гражданские объекты.

Протестантский храм, или дом молитвы (такое название встречается чаще), с архитектурной точки зрения предусматривает творческий подход, сочетая в себе смешение стилей и направлений и

ориентируясь на архитектурные и культурные традиции той территории, к которой он относится. Поэтому архитектура протестантизма разнообразна, она приобретает оттенки и колорит местных строительных приемов, архитектурных стилей и направлений. Храмы могут быть необычны, оригинальны и красивы, но чаще всего эта красота заключается в простоте и минимализме архитектурных решений – это основная особенность протестантской ветви христианской религии. В отличие от древних эпох, когда архитектура культовых сооружений определяла стиль эпохи (в Античности, Византии, в готическом или романском городе храм резко отличается от гражданских, тем более жилых, сооружений), в настоящее время храм – носитель типологического диапазона. Зачастую он мало чем отличается в рядовой застройке от обычных домов [3].

Протестантизм, являясь концептуальной антитезой католицизму, сформулировал и отличительные внешние признаки. Одна из его характерных черт – лаконичность фасадов. Даже являясь составляющей пластически развитого архитектурного ансамбля, протестантский храм может «выбиваться» из общего стиливого решения. Для протестантского храма характерно и отсутствие чрезмерного украшения интерьера, поскольку все внимание прихожан должно быть обращено к пастору. Вследствие этого архитектурная выразительность здания достигается путем организации света в интерьере, пластики фасадов и внутренних стен. Эта черта нашла свое отражение и в храмах других христианских конфессий в Беларуси. Так, например, костелы в д. Кременица и д. Деревное или Троицкая церковь в Слониме (изначально – католический храм монастыря бернардинцев) имеют аскетичные простые фасады с ярко выраженным ярусным членением и выступающими акцентами полуколонн. В слонимском храме также прослеживается типичный для протестантской архитектуры мотив восьмигранного барабана. Этот же элемент присутствует в башне Ружанского костела.

Характерная форма протестантского храма – однонефный протяженный объем с входом через башню, представляющую собой главный фасад. Такой тип планировки получил широкое распространение на территории Беларуси: костелы в Ружанах, Слониме и Новом Свержени, Троицкая церковь в д. Белая Церковь и многие другие храмы были спроектированы и построены именно по этой схеме. Такая форма может быть обусловлена и тем, что поскольку главным действующим лицом в протестантизме является пастор, то важную роль в литургическом процессе играет акустика, такая, что усиление голоса священника преследует не только цель повышения громкости, но и сохранения при этом разборчивости речи.

Конечно, эти архитектурные приемы были свойственны не только протестантской архитектуре, но именно в ней они получили наиболее широкое распространение и именно Реформацию можно считать катализатором их популярности. Нелегко выделить композиционные схемы и символические совокупности, характерные именно для белорусской протестантской архитектуры ввиду непродолжительности периодов активного строительства и большого временного промежутка между ними.

Тем не менее, опираясь на дошедшие до нас строения кальвинских сборов в Сморгони и Кухтичах, можно говорить о том, что на территории Беларуси также часто использовались протестантские храмы круглые или многоугольные (шесть и более) в плане. Имелась в наличии и характерная для протестантизма единственная вертикальная доминанта – башня, которую можно увидеть на всех сохранившихся памятниках протестантского храмового зодчества. Следовательно, данные мотивы и элементы смело можно относить к характерным и широко использовать в современном строительстве протестантских культовых сооружений. Поэтому и подавляющее большинство протестантских храмов, построенных в XX веке в Беларуси, имеют архитектуру, подобную современным церквям США. Следует отметить, что при этом стиливые черты большинства протестантских храмов Беларуси лишены выразительности и цельности.

Нередко становятся совершенно очевидными погрешности в понимании символики архитектурных форм этих культовых сооружений. Это происходит потому, что арсенал выразительных средств христианской символики используется без осознания ее значения. Например, в храмах в Кобрине и Колодищах используется для витражей мотив «капли» в значении «ран Христовых», но не соответствует необходимому количеству – пять (по числу ран соответственно), из чего вытекает, что вероятно архитектор не полностью осознавал семантику данного символа.

Следует отметить, что в проектах большинства протестантских храмов архитектор подошел к образу «дома» чересчур формально, либо не утруждал себя развитием образа храма. Так, храмы в п.г.т. Антополь (Дрогичинский район, Брестская область), д. Телеханы (Ивацевичский район, Брестская область), д. Стошаны (Пинский район, Брестская область), в Кобрине (Брестская область) и ряде других населенных пунктов являют собой строения, мало отличимые внешне от рядовых загородных домов.

Можно наблюдать заимствование архитектурных цитат из культовых сооружений в течение всей их истории. Так, храм в Парохонске (Пинский район, Брестская область) имеет все черты белорусского

барокко, а протестантский храм в Пинске выглядит так, будто его построили в конце XIX века в промышленном стиле, хотя оба храма построены в 90-е годы XX века. Не всегда это заимствование уместно – один из Кобринских храмов при всем стремлении совместить форму и предназначение имеет в своем облике некоторые элементы, например, арку с так называемой «гирькой», которая не характерна не только для протестантской архитектуры, но и для белорусской архитектурной традиции в целом.

Таким образом, перед исследователем встают 2 основные проблемы, которые возникли перед современной белорусской культовой архитектурой протестантизма:

1) в ситуации формального отделения церкви от государства, но при наличии фактического патронажа Русской Православной Церкви протестантские объединения столкнулись с недостатком финансирования и поддержки как государством, так и местными органами управления, что не позволяет большинству общин сотрудничать с крупными проектными институтами и архитектурными мастерскими, а также получать доступ к строительным площадкам в центральных зонах населенных пунктов;

2) ввиду долгого периода отсутствия строительства протестантских и вообще храмовых сооружений оказалась разорванной связь между архитектурной традицией в целом и культовой архитектурой в частности. Архитектурный образ храма как такового, протестантского в частности, не развивался и находился в изоляции от общей манеры архитектуры, поэтому отсутствует само представление о проекте храма в контексте современных архитектурных тенденций. Отсутствуют какие-либо строительные нормы и рекомендации относительно проектирования и строительства данного типа зданий.

Архитекторам, перед которыми встает задача проектирования протестантского культового сооружения, также следует учитывать ландшафт и окружающую среду, как природную, так и градостроительную. Причина в том, что храм, как и любое здание, претендующее на эстетическое восприятие окружающими, должен быть увязан со средой, основываясь на основных композиционных взаимодействиях: балансе, нюансе либо контрасте.

Протестантский храм – общественно-культовое сооружение, соответственно, являет собой так называемую «точку притяжения», которая влияет на градостроительный ансамбль и не может рассматриваться в отрыве от него. Это значит, что храм, став частью общеархитектурного мышления, является частью гармоничной архитектурной среды. Новое значение в современном мире приобретает традиционная проблема отношения между зданием церкви и окружающей средой.

В истории архитектуры церковь везде – в городе или на открытом пространстве – играла роль смысловой и композиционной доминанты. Сейчас ситуация изменилась, и оставаться по-прежнему архитектурной доминантой церковь может либо в специально спроектированном ансамбле, либо в природном ландшафте [3].

Протестантизм, будучи исключительно христоцентрической ветвью христианства, может оперировать большим количеством христологических символов. Среди них можно выделить:

- орнитоморфные (пеликан/вальдшнеп, орел, голубь, феникс, павлин);
- ихтиоморфные (рыба, кит, якорь, корабль, парус);
- зооморфные (агнец, лев);
- космологические (шар, земля, спираль, око).

Эти символы вполне могут послужить образами для композиции храмовых сооружений как с точки зрения непосредственно облика, так и с точки зрения некоторых элементов здания, интерьера и отделки. Архитекторам следует шире рассматривать образ храма, стремиться придать ему узнаваемый облик с высокой эстетической ценностью и стараться избегать стереотипов [4].

Социальную значимость протестантским культовым объектам придают их дополнительные функции – воскресные школы, помещения для массовых мероприятий. При проектировании протестантских храмов стоит учесть, что поскольку эта конфессия изначально была направлена на просветительскую деятельность, то превращение такого храма в многофункциональный комплекс с насыщением его культурно-массовыми и социально-просветительскими функциями лишь повышает его социальную роль и делает его более цельным с точки зрения изначальной религиозной идеи. Поэтому в качестве рекомендаций при проектировании можно добавить насыщение протестантской церкви функционалом – организовывать на их базе образовательные и культурные учреждения, библиотеки, концерты и т.п.

Задача современного архитектора – найти материальное отображение теологического видения нынешнего века точно так же, как готика воплощала его в XI веке. Культовое зодчество открывает перед архитектором невероятно широкое поле для деятельности. Еще Оскар Нимейер утверждал: «Проектирование собора, вне всякого сомнения, – одна из самых привлекательных тем, которые только можно предложить архитектору».

Заключение. Для повышения эстетико-архитектурных качеств протестантских храмов в первую очередь проектирующим их архитекторам стоит изучить опыт и достижения в этом направлении зарубежных коллег, а также преобладающие веяния в мировой и белорусской архитектуре. При наличии отрыва современной белорусской протестантской архитектуры от архитектурной традиции необходимо приложить максимальные усилия для сокращения и нивелирования этого отрыва.

Следует обратить внимание на достижения в области строительных материалов и конструкций, которые могут быть пригодны для создания архитектурного облика протестантского храма, старательно анализировать удачные решения в данной области как архитекторов-соотечественников, так и зарубежных коллег.

ЛИТЕРАТУРА

1. Габрусь, Т. Мураваныя харалы: Сакральная архітэктура беларускага барока / Т. Габрусь. – Мінск: Ураджай, 2001. – С. 84 – 90.
2. Котлярчук, А. Швэды ў гісторыі і культуры беларусаў / А. Котлярчук. – Мінск: Энцыклапедыкс, 2002. – 272 с.
3. Смородинова, П.Л. Эволюция архитектуры западных христианских церквей в XX веке / П.Л. Смородинова // Архитектура и Строительство России. – 2007. – № 8 – С. 25 – 30.
4. Лаврецкий, Н.Г. Храм – путь от дома к Космосу / Н.Г. Лаврецкий // Архитектура и Строительство. – 2010 – № 3. – С. 104 – 105.

Поступила 23.05.2012

SPECIFIC FEATURES OF ARCHITECTURAL AND STYLISTIC FACE OF PROTESTANT CHURCHES IN BELARUS

N. LAVRETSKIY

We study the existing historic features typical of Protestant architectural structures in Belarus. It is presented a forecast of the possible ways to develop them with subsequent architectural tradition restoration. We considered two basic problems arisen more early than the Belarusian, modern, cult Protestant architecture appeared. One of its characteristics is brevity of the facades. A typical form of the Protestant church is nave extended amount of the entrance through the tower, the main facade. These architectural techniques were inherent in the architecture, not only Protestant, but also they were the most widespread.

УДК 72.032(569.1)

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ БАЗИЛИКАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ СИРИИ IV – VII ВЕКОВ**ХАРМА УСАМА МОХАММАД***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассматривается развитие одного из основных типов сирийских христианских церквей IV – VII веков – базилика. В христианской архитектуре Сирии этого времени развивались латитудинальные, базиликальные и центрические композиции. В основе данных типов архитектурно-пространственной системы нашли воплощение общие принципы планировки храмов. Планировка, основанная на использовании принципа соответствия частей и целого, дает возможности широкого использования различных композиций. Сирийская архитектура этого времени оказала значительное влияние на формирование византийского зодчества. Базиликальные постройки Сирии несут в себе черты нового понимания храмового пространства. Эта композиция повлияла на формирование образа христианского храма в Западной Европе.

Сирийская христианская архитектура основана на творческой переработке античных римских форм и использовании богатейшего опыта строительной культуры Междуречья. Среди таких объемно-пространственных композиций, проникнутых новой символикой, были и свойственные только Сирии латитудинальные церкви и базилики, оказавшие несомненное влияние на западноевропейскую и армянскую архитектуру.

Основная часть. Базилика (слово состоит из гр. *basileios* – царь и *oikia* – дом; лат. *basilica*) – царский дом. Базиликами в античном Риме назывались общественные здания, предназначенные для суда и торговли, а в христианский период – церкви. Само название указывает на греческое происхождение подобных зданий. Действительно, мы знаем, что в V веке до н. э. существовало в Афинах здание, известное под названием *basileos stoia*. Это сооружение было местом судебных отправлений, местом собрания ареопага и была центром письменного афинского законодательства. Понятие «Стоя» являет собой именно здание с колоннами, потому что греческое «стоя» соответствует латинскому понятию «портик», что обозначает часть здания, образуемую колоннами. Такие сооружения были не в одних только Афинах, но также в Спарте, Пирее и Агригенте. Необходимо принять во внимание распространенность зданий этого типа в Греции, несомненное влияние греческой архитектуры на римскую и то обстоятельство, что первые базилики в Риме появляются лишь во II веке до н. э., следовательно, почти на два с половиной века позже, чем в Греции. Можно принять за несомненный факт, что базиликальная форма зданий была заимствована римлянами, как и многое другое, у греков.

Сводя различные данные, добытые путем рассматривания дошедших до нас остатков римских базилик, мы можем прийти к следующим выводам: это были большие продолговатые здания, которые располагались близ городских площадей; они разделялись несколькими рядами колонн на нечетное число пролетов, или нефов, из которых средний был самый широкий и высокий; боковые нефы представляли собой двухэтажные галереи, в раннюю эпоху они покрывались балками, а позже сводами; в них устраивалась всегда абсида и вима для суда. Зала освещается верхними окнами, т.е. окнами, расположенными сверху среднего нефа, в стене над колоннами.

В раннехристианские времена появляются купольные базилики. Со времен Константина Великого христиане взяли за образец Римскую базилику, а алтарная апсида – преобразованная судебная апсида базилики. Вероятно, и алтарная преграда была ранее решеткой, ограждавшей помещение судей и писцов. У греков алтарная перегородка называлась *kinklides* (*kankella* – канцелярия). Эти названия первоначальны и означают решетку. В первое время алтарь был доступен и для мирян, приступавших в нем к самой святой трапезе для принятия Тела и Крови Христовой. Так было еще во времена Исидора Пелусиота (+440). Это же следует из жития Василия Великого. Из трудов Димитрия Ростовского следует, что в Кесарии Кападокийской не было алтарной преграды до его времени; древнейшая церковь св. купины на Синае до XIX века ее не было. Высота перегородки была по грудь. Низ под местным чином – напоминание о древней преграде. Описательно этот элемент назывался *thorakes* – нагрудник, *stitheia* – погрудник, *pektoraria* (собственно грудь). В житии Евфимия Великого пишется, что на неё можно было облокотиться). На ее дверцах был водружен крест, и император, входя в церковь, мог его целовать без лестницы. Именно такая перегородка и послужила началом формирования алтарной преграды, сначала развивавшейся в раннехристианской церкви, а затем получившей свое развитие в православной архитектуре.

Базиликальный тип церковного сооружения – прямоугольное, вытянутое по продольной оси сооружение, имеющее несколько нефов, из которых центральный выше остальных. Это позволяет организовать его освещение через окна, устроенные в верхней части. Его источники лежат в римских древнехристианских базиликах IV века, определивших основную схему сирийских базилик, в которых, однако, столичные архитектурные идеи подверглись значительной переработке на основе принципов восточной школы византийской архитектуры, продолжающей восточную школу римской архитектуры. Консерватизм сирийской

архитектуры сказался на том, что в ней еще в V и VI веках господствует базиликальный тип, который в Константинополе в это время встречается только в виде исключения (базилика Студийского монастыря).

Сирийские базилики были родоначальниками, с одной стороны, романских храмов Западной Европы, а с другой – ранних базилик Кавказа. Сирийская базилика совсем не имеет атрия и стоит совершенно изолированно, причем в ней большую роль играет композиция наружных масс. Общая схема трех нефов с апсидой, замыкающей главный неф, а также базиликальный разрез, как правило, сохраняются. Но колоннады, отделяющие нефы друг от друга, обычно заменяют довольно низкими и массивными столбами, причем арки между столбами стремятся сделать большими.

Перекрытие в сирийских базиликах долгое время остается деревянным. В отличие от римских базилик IV века, все формы очень тяжелы, массивны и конкретно-материальны. Нет и следа столичного одухотворения материи. Особенно характерны широкие пролеты арок, обрамляющих средний неф. Вместо непрерывных рядов колонн, ведущих к алтарю, внутреннее пространство сирийских базилик разложено на ряд латитудинальных пространств, которые привносят элементы той концепции, которую мы наблюдаем в месопотамских латитудинальных храмах. Это особенно ярко выражается в одном специальном типе сирийских базилик, в котором все внутреннее пространство разбито проходящими насквозь от стены до стены поперечными стенками на ряд латитудинальных пространств, слоями расположенных друг за другом, причем исчезает базиликальный разрез. С этим разложением лонгитудинального здания на латитудинальные ячейки связано также появление боковых дверей на длинных сторонах базилики, обыкновенно по две на каждой, и подчас оформление их небольшими навесами на колоннах, подчеркивающих значение боковых дверей и умаляющих роль главных ходов.

Особенно интересно оформление нартекса, который из элемента композиции внутреннего пространства, каким он был в римских зданиях IV века, в Сирии в V и VI веках превратился в существенную составную часть композиции наружных масс базилики. По сторонам его возвышаются две угловые башни, а между ними широкая арка обрамляет открытое наружу пространство нартекса (называемого в таком виде «экзонартекс», т.е. внешний нартекс), отделенной от внутренней части стеной с дверями. Вся эта композиция двухбашенного фасада с открытым пролетом в середине перешла впоследствии в романскую архитектуру и имеет своих предшественников в восточной школе римской архитектуры, например, в Большом храме в Баальбеке и в других памятниках. Можно предположить, что в Сирии уже сложилась и композиция базилики с четырьмя одинаковыми башнями по углам, которая так характерна для больших романских соборов Германии XII века. Времена становились все более беспокойными, особенно в восточных провинциях Византийской империи, постоянно подверженных нападению извне и всевозможным внутренним восстаниям и столкновениям. Поэтому и с этой точки зрения понятна крепость сирийских зданий и большое количество башен, которые становятся необходимой составной частью архитектурных композиций. Наружные массы сирийских базилик ясны и четки. Господствует двухбашенный фасад, который выделяет вход. К нему ведет лестница. Стены из хорошо отесанных квадров камня часто перекрывались сверху тонким слоем штукатурки. Боковые нефы снаружи четко отделены от среднего нефа. Немногочисленные обломы украшают стены и обрамляют незначительные световые отверстия. Апсида снаружи иногда обрабатывалась аркатурами на колонках, которые встречаются и внутри, где они опираются на консоли и где на них положены стропила кровли среднего нефа. Это – дальнейшее развитие мотивов колонок, в зданиях восточной школы римской архитектуры (Золотые ворота дворца Диоклетиана в Спалато и др.), которые затем перешли в романскую архитектуру через посредство зодчества Сирии.

Сирийские базилики положили начало, с одной стороны, романским храмам Западной Европы, а с другой – ранним храмам Кавказа. Сирийская базилика не имеет атрия. Характерны широкие пролеты арок, обрамляющих средний неф (церкви в Бакизе, Гераде, Дейр Сете). Вместо рядов колонн, ведущих к алтарю, внутреннее пространство разделено на ряд развитых по ширине пространств. Это особенно ярко выражается в типе сирийских базилик, где все внутреннее пространство расчленено поперечными стенками на ряд латитудинальных пространств. Наиболее ярким примером храмов такого типа – церковь в Тафке (кон. V – нач. VI в.). До сегодняшнего времени этот памятник раннего христианства экспонируется как археологический объект. Нартекс из элемента композиции внутреннего пространства, каким он был в римских зданиях, в Сирии в V и VI веках превратился в существенную составную часть композиции наружных масс базилики.

Можно предположить, что в Сирии сложилась и композиция базилики с четырьмя башнями по углам, которая характерна для больших романских соборов Германии XII века. Восточные провинции Византии постоянно подвергались нападению извне, чем вызвана крепость сирийских зданий и большое количество башен, которые становятся необходимой составной частью архитектурных композиций.

Не только сохранившиеся и законсервированные руины христианских святынь дают представление о развитии архитектурной мысли Сирии того времени. На различных изделиях (светильники, ампулы, перстни и литургические штампы) для паломников, посещавших Святую Землю, сохранились изображения утраченных ныне храмов и икон. На литургических предметах можно видеть изображения храма над гробом мученика, что также является ценным иконографическим материалом для изучения архитектурного наследия христианской Сирии. Однако имея достаточно материала, который позволяет провести графическую реконструкцию, в реальность такие проекты не воплощаются. Одним из таких объектов

является уникальный комплекс в Калат Семане. Притом что это одно из наиболее часто посещаемых памятниками и туристами мест, святыня, связанная с жизнью св. Симеона Столпника, не стала в угоду своей популярности макетом в натуральную величину.

Для введения памятников в культурную жизнь современной Сирии требуется выработка особого подхода в экспозиции исторических объектов. При этом используются различные методы проведения реставрационных работ. Так сложилось, что памятники раннехристианского периода не претерпели стилистических изменений, связанных со сменой конфессиональной принадлежности, и методы полной реконструкции или обновления не использовались. Наиболее часто применяемый метод – консервация руин, проведение комплекса инженерно-технических мероприятий по укреплению конструкций и организации территории объекта под руководством специалистов (церковь в Бакирке, Кальб Лузе). Используются все возможные достижения и средства для укрепления деструктурированной поверхности каменных блоков и др. При этом для достижения конструктивной стабильности и экспозиционной целостности приходится вводить новые элементы, которые, не входя в противоречия с аутентичными элементами, обязательно сохраняют различия.

Есть примеры и проведения на историческом объекте цикла ремонтных работ с частичным, строго ограниченным восстановлением отдельных деталей. Это связано и использованием памятника в его непосредственной функции – как христианский храм. В большей степени здесь можно говорить о синтезе метода «анастилоза», сформировавшегося в начале XX века и предполагающего укрепление уцелевших элементов в сохранившемся состоянии, и аналитического метода. Пример тому – церковь в Эзре, которая и сегодня используется как место молитвы. Найдено органичное сочетание древних стен и колокольни, не противоречащей своими формами историческому облику храма. На территории многих руинированных памятников сохраняются упавшие с них детали. Если возможно установить точное первоначальное положение того или иного элемента, его можно поставить на своё место, но чаще эти элементы составляют роль археологического экспоната, в то время как памятник архитектуры является своеобразным «вместилищем», экспозиционной площадкой. При этом ценно, что непосредственно вблизи можно изучить особенности пластики и методики техники древних мастеров. Притом что найдено довольно много фрагментов архитектурных конструкций и декоративной пластики, ученые не пошли по пути целостной реставрации (Каср ибн Вардан). Однако понимание научного значения древнего памятника оправдывает тот метод консервации, который и был использован. В стенах вместо замены целых фрагментов или разделенных швами блоков камня были произведены мелкие вставки, заполняющие по неправильному контуру лакуны (подобный принцип использовался при консервации арки Константина в Риме).

Заключение. Благодаря реставрационным работам, проведенным с четким научным обоснованием и исполнительским мастерством, мы имеем возможность изучать, классифицировать и популяризовать памятники раннего христианства Сирии, в частности, базилики. Новые технологии и подходы в реставрации позволят найти такие решения, которые еще в большей степени раскроют особенности архитектуры IV – VII веков в Сирии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайловский, Е.В. Реставрация памятников архитектуры (Развитие исторических концепций) / Е.В. Михайловский. – М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1971.
2. Пруцын, О.И. Архитектурно-историческая среда / О.И. Пруцын, Б. Рымашевский, В. Борусевич; под ред. О.И. Пруцына. – М.: Стройиздат, 1990.
3. Реставрация памятников архитектуры: учеб. пособие для вузов / С.С. Подъяпольский [и др.]; под общ. ред. С.С. Подъяпольского. – М.: Стройиздат, 2000.
4. Syrie centrale. Architecture civile et religieuse du I au VII siècle. – Paris, 1865 – 1877.
5. Balanos, N. Les monuments de l'acropole / N. Balanos. – Paris, 1938.

Поступила 23.05.2012

FORMATION AND DEVELOPMENT OF SYRIAN BASILICA ARCHITECTURE IN IV – VII CENTURIES

XARMA OSAMA MOHAMMAD

The article is devoted to analyze of one of the main types of Syrian Christian architecture, that took place in IV – VII cc. It is called basilica. There were Latitudinal, basilical, central compositions developed in Syria at that time. In foundation such types of architectural and spatial system general approaches of church planning were materialized. Planning was based on employment of principle of compatibility of small elements and the whole shape. Syrian Christian architecture of that time had a great influence on development of Byzantine culture. Syrian basilical buildings of IV – VII s. include elements of new trends in church space. Such composition influenced on creation of christian church image in the Western Europe.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.45.046

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА БЕЗ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННОГО БАНКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

канд. техн. наук, доц. **Н.А. РАК, С.Ю. ТАМКОВИЧ**
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

На основе расширенного банка экспериментальных данных анализируются методы расчета прочности элементов из тяжелого бетона без поперечной арматуры при продавливании. С использованием расширенного банка экспериментальных данных выполнена оценка точности расчета норм проектирования, действующих на территории Республики Беларусь. Определен индекс надежности конструкций, обеспечиваемый при расчете по этим нормам проектирования. На основании анализа даны предложения по совершенствованию методов расчета железобетонных плит при продавливании.

Введение. Авторами в работах, опубликованных ранее, с помощью банка экспериментальных данных, выполнена оценка точности и надежности методик норм, действующих на территории Республики Беларусь: СНБ 5.03.01-02 [1] и европейских норм в виде ТКП EN 1992-1-1:2009 [2] с национальным приложением. Со временем появлялись новые доступные литературные источники, банк экспериментальных данных пополнялся, в результате общее количество образцов достигло 334, тогда как в первом банке, по которому проводилась оценка точности и надежности, а также давались рекомендации, было 260 образцов. На основании этого нами было принято решение о проведении оценки точности и надежности с учетом расширенного банка экспериментальных данных и выполнено сравнение с ранее полученными значениями.

Методы расчета. Изучение действующих на территории Республики Беларусь двух нормативных документов по расчету железобетонных конструкций показало, что они исходят из того, что прочность на продавливание зависит от периметра критического сечения, расчетной высоты плиты и сопротивления бетона на сжатие. При этом условие прочности железобетонных плит из тяжелого бетона на продавливание без поперечной арматуры может быть представлено в следующем обобщенном виде:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd,c} = f_{c,ps} \cdot u \cdot d, \quad (1)$$

где V_{Sd} – продавливающая сила; V_{Rd} – усилие, воспринимаемое бетоном плиты при продавливании; $f_{c,ps}$ – расчетное сопротивление бетона срезу при продавливании; u – периметр условного критического сечения; d – рабочая высота плиты.

Расчетное сопротивление бетона срезу при продавливании $f_{c,ps}$ может быть определено по следующей обобщенной формуле:

$$f_{c,ps} = \alpha_p \cdot \alpha_d \cdot f_{cs}, \quad (2)$$

Здесь f_{cs} – расчетное сопротивление бетона простому срезу; α_p – коэффициент, учитывающий влияние продольной рабочей арматуры плиты; α_d – коэффициент, учитывающий влияние масштабного фактора.

В таблице 1 представлены аналитические выражения и коэффициенты, входящие в формулы норм. При этом для наглядности анализа и упрощения аналитических зависимостей рассмотрен только вариант продавливания плиты перекрытия без поперечной арматуры, центрально сжатой колонной. В связи с этим дополнительные условия, представленные в нормах, учитываться не будут, так как было установлено, что выполнение этих условий происходит только при больших толщинах плит, что характерно для фундаментов, а также при использовании высокопрочных бетонов с малым процентом армирования.

В приведенных в таблице 1 зависимостях сохранены обозначения нормативных документов: f_{ck} , f_{ctk} – соответственно нормативные (цилиндрическое) сопротивления бетона осевому сжатию, растяжению, определенные с обеспеченностью 0,95 МПа; γ_c – коэффициент безопасности по бетону; l_c – длина стороны (диаметр) грузовой площадки; ρ_l – коэффициент продольного армирования; d – рабочая высота.

Таблица 1

Расчетные зависимости для расчета плит на продавливание

Нормативный документ	f_{csh}	α_p	α_d	U
СНБ 5.03.01-02 [1]	$\frac{C_{Rd,c}}{\gamma_c} f_{ck}^{1/3}, C_{Rd,c} = 0,225$	$(100\rho_l)^{1/3}$ $\rho_l \leq 0,02$	$\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \leq 2$	$sq: 4l_c + 3\pi d$ $C: \pi(l_c + 3d)$
ТКП EN 1992-1-1:2009 [2]	$\frac{C_{Rd,c}}{\gamma_c} (f_{ck})^{1/3}, C_{Rd,c} = 0,18$	$(100\rho_l)^{1/3}$ $\rho_l \leq 0,02$	$\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \leq 2$	$sq: 4l_c + 4\pi d$ $C: \pi(l_c + 4d)$
СНБ 5.03.01-02 [1] с учетом поправки [3]	$\frac{C_{Rd,c}}{\gamma_c} f_{ck}^{1/3}, C_{Rd,c} = 0,24$	$(100\rho_l)^{1/3}$ $\rho_l \leq 0,02$	$\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \leq 2$	$sq: 4l_c + 3\pi d$ $C: \pi(l_c + 3d)$
sq – квадратная колонна; C – круглая колонна.				

Формирование банка экспериментальных данных. Первоначальный банк экспериментальных данных (БЭД) по испытаниям железобетонных элементов на местный срез [3] содержал 260 образцов, однако со временем появлялись новые доступные источники, в результате чего в банк добавлялись новые образцы, испытание большинства которых было выполнено в 2000-х годах. Среди таких работ следует выделить работы Tassinari (2007), Guidotti (2010), Sakinis (2009). Также в БЭД были добавлены образцы, испытание которых производилось в середине XX века. Это работы Base (1966), Monterola (1966) и Yitzhaki (1966). Все добавленные образцы соответствовали критериям, представленным в [3]. В результате общее число экспериментальных значений составило 334 образца. Учитывая значительное изменение количества образцов, а именно увеличение выборки приблизительно на 30 %, было принято решение о проведении повторной оценки точности и надежности методик расчета, представленных в [1; 2], а также предложенных в [3], и уточнить функцию продольного процента армирования [5] с использованием расширенного БЭД. Краткая характеристика образцов рабочей выборки дана в таблице 2, где представлены только те исследования, в которых общее количество опытных образцов превышало 3 штуки.

Таблица 2

Основная выборка с краткими данными опытных образцов

Автор (год исследования)	Кол-во	d , мм	l_c , мм	f_c , МПа	ρ , %	V_{exp} , кН
Elstner (1956)	26	114 ~ 117	254 ~ 355	10,3 ~ 40,4	0,9 ~ 3,7	303 ~ 579
Kinnunen (1960)	19	117 ~ 130	Ø150 ~ 300	24,1 ~ 33,5	0,47 ~ 1,54	198 ~ 541
Moe (1961)	16	114	152 ~ 388	20,5 ~ 35,2	1,02 ~ 1,5	311 ~ 440
Base (1966)	18	102 ~ 124	203	14 ~ 41,4	1 ~ 1,9	247 ~ 541
Monterola (1966)	8	107	100 ~ 450	24,2 ~ 39,7	0,5 ~ 1,4	165 ~ 397
Yitzhaki (1966)	6	82	201; Ø119 ~ 300	10 ~ 18,1	0,5 ~ 8,5	98 ~ 239
Kakuta (1974)	22	120 ~ 170	100 ~ 300	15,4 ~ 53	0,79 ~ 3,37	190 ~ 750
Regan (1980, 1986, 1993)	26	93 ~ 200	Ø50 ~ 250	11,92 ~ 58	0,58 ~ 1,52	123 ~ 825
Iwaki (1985)	5	95	Ø98 ~ 408	25,6 ~ 26,1	1,0 ~ 2,0	178 ~ 384
Tolf (1988)	8	99 ~ 200	Ø125 ~ 250	19,9 ~ 31,7	0,35 ~ 0,8	145 ~ 603
Gardner (1990)	8	81 ~ 124	Ø76 ~ 203	14,5 ~ 52,1	0,47 ~ 2,14	108 ~ 357
Hussein (1991)	10	95 ~ 120	150	52,5 ~ 87,5	0,49 ~ 2,33	178 ~ 645
Siao (1994)	11	99 ~ 200	254; Ø125 ~ 300	22,9 ~ 34,7	0,79 ~ 1,54	194 ~ 603
Ramdane (1996)	13	98 ~ 102	150	26,9 ~ 68,4	0,6 ~ 1,3	169 ~ 341
Sistonen (1997)	10	170 ~ 177	Ø201 ~ 901	24,1 ~ 32,7	0,45 ~ 1,17	478 ~ 1111
Monterolla (2002)	11	101 ~ 220	120 ~ 150; Ø240 ~ 250	23,4 ~ 57	0,69 ~ 2,86	208 ~ 1113
Kosa (2003)	5	170	300	26 ~ 42,9	0,54 ~ 0,85	609 ~ 716
Liu Huang (2004)	5	125	224 ~ 300	30,1 ~ 39,6	0,8 ~ 1,91	440 ~ 557
Guandalini (2005)	6	96 ~ 210	130 ~ 260	27,6 ~ 34,7	0,33 ~ 1,5	238 ~ 1023
Hamada (2005)	14	95	100 ~ 200	32,5 ~ 42,2	0,556	127 ~ 233
Tassinari (2007)	8	100 ~ 104	130	20,8 ~ 27,5	0,49 ~ 0,75	150 ~ 221
Mirzaei (2008)	12	102	130	31 ~ 40,4	0,49 ~ 1,41	211 ~ 295
Sakinis (2009)	6	106 ~ 112	200	27,2 ~ 37,3	0,5 ~ 1,5	295 ~ 403
Guidotti (2010)	14	194 ~ 208	260	31,5 ~ 51,7	0,77 ~ 1,62	763 ~ 1543

Для каждого экспериментального образца были определены значения теоретической разрушающей нагрузки при заданных исходных данных. Расчеты опытных образцов выполнены по методикам, указанным в таблице 1. При всех вычислениях использовались фактические (средние) значения

геометрических параметров образцов и прочностных характеристик материалов. Для каждой методики расчета определено отношение опытной и вычисленной (теоретической) несущей способности для каждого образца. Количественные отношения опытных образцов к отношению опытной к теоретической нагрузке представлены на рисунке 1.

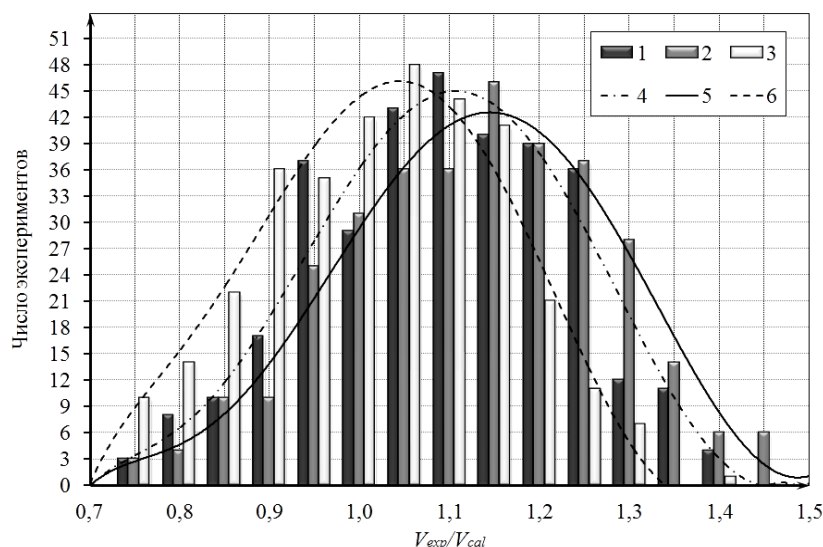


Рис. 1. Распределение отношений опытной нагрузки V_{exp} к теоретической V_{cal} для методов расчета, представленных в таблице 1, и аппроксимирующие кривые.

1 – [1]; 2 – [2]; 3 – [1] при $C_{Rd,c} = 0,24$;
4, 5, 6 – аппроксимирующие кривые при $C_{Rd,c} = 0,24$ соответственно для [1], [2], [1]

Из рисунка 1 видно, что распределения отношения опытной нагрузки к теоретической в общей совокупности близки к нормальному распределению для всех рассматриваемых методов расчета. Это свидетельствует о том, что формулы методик достаточно хорошо учитывают влияние всех факторов, а разброс значений вызван влиянием иных, не учитываемых формулами, условий.

Основные результаты оценки точности методов расчета представлены в таблице 3. При этом для наглядности в таблице также представлены значения поправки среднего значения b и коэффициента вариации величины рассеяния δ , полученные ранее в работе [3] при использовании первоначального банка данных.

Таблица 3

Основные результаты оценки точности методов расчета

Параметры	Нормативный документ					
	[1]		[2]		[1] при $C_{Rd,c} = 0,24$	
Количество образцов в базе	260	334	260	334	260	334
Поправка среднего значения b	1,123	1,073	1,164	1,106	1,045	1,012
Коэффициент вариации V_δ	0,139	0,129	0,155	0,142	0,140	0,128

Анализ результатов, представленных в таблице 3 и на рисунке 1, для расширенного БЭД, содержащего 334 образца, позволил сделать следующие *выводы*:

1) отклонения поправки среднего значения b близки к 1, не превышают 1,1 и отличаются друг от друга незначительно;

2) значения коэффициента вариации V_δ величины рассеяния δ не превышает 0,142;

3) незначительное отличие значений поправки среднего значения b и коэффициентов вариации V_δ величины рассеяния δ для методов расчета, по-видимому, обусловлено практически одинаковыми подходами к механизму разрушения от продавливания, а также одинаковыми расчетами прочности бетона на срез.

Уточнение зависимости для учета влияния продольного армирования. Ранее авторами в работах [4; 5] была предложена новая, линейная, зависимость (3) для учета влияния продольного процента армирования:

$$f_{\rho} = 0,35\rho + 0,65, \quad (3)$$

где ρ – процент продольного армирования.

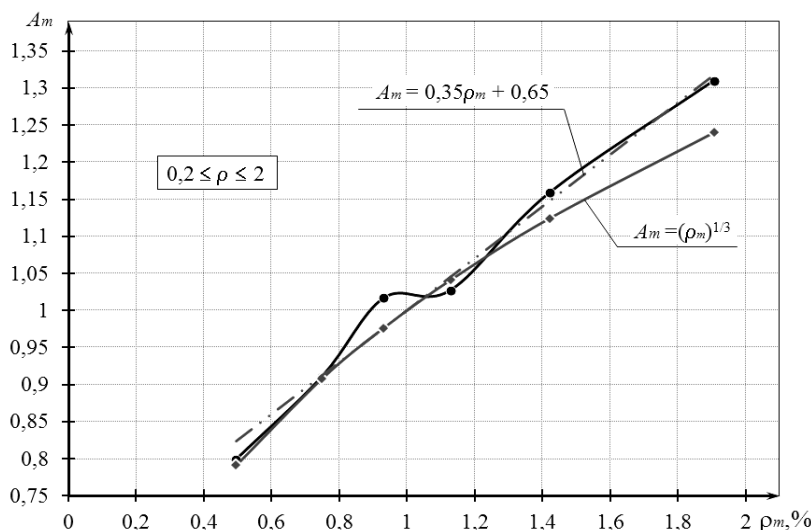
Принимая во внимание, что количество образцов в БЭД изменилось, нами осуществлено уточнение предлагаемой функции с учетом нового количества образцов. Для этого новый банк экспериментальных данных был разделен на группы образцов в зависимости от коэффициентов армирования, исходя из того, что $0,002 \leq \rho_l \leq 0,02$ согласно [1]. В результате было сформировано 6 групп образцов, представленных в таблице 4.

Таблица 4

Группы образцов

№ группы	Интервал процента армирования	Количество образцов	A_m	ρ_m , %
1	0,2 – 0,59	57	0,80	0,50
2	0,6 – 0,81	55	0,91	0,75
3	0,82 – 1,049	59	1,01	0,93
4	1,05 – 1,25	58	1,03	1,13
5	1,26 – 1,56	53	1,16	1,42
6	1,57 – 2	52	1,31	1,91

На следующем этапе, используя полученные значения, был построен график функции зависимости A_m от процента продольного армирования ρ_m (рис. 2).

Рис 2. Функция зависимости A_m от процента продольного армирования ρ_m

Как видно из рисунка 2, предлагаемая в [4] функция учета влияния продольного армирования практически не отличается по значениям от функции, используемой в [1] и [2] для процентов армирования в диапазоне от 0,7 до 1,2, в то время как для процентов армирования более 1,2 функция (3) дает лучшее совпадение с функцией, построенной на основании опытных данных. Следовательно, можно сделать вывод о том, что использование предлагаемой функции позволит повысить точность методики расчета для процентов продольного армирования более 1,2 и тем самым снизить излишние запасы надежности, характерные для норм [1] и [2], как показали результаты, представленные в [3].

Таким образом, было принято решение оставить зависимость для расчета несущей способности железобетонных элементов при продавливании (с учетом предложенной в [3] поправки), полученную в [5]:

$$V_{Rd,c} = 0,24 \cdot k \cdot (35\rho_l + 0,65) \cdot (f_{ck})^{1/3} \cdot u \cdot d. \quad (4)$$

Количественные отношения опытных образцов к отношению опытной к теоретической нагрузке для методики расчета (4) представлены на рисунке 3, из которого видно, что распределение отношения опытной нагрузки к теоретической в общей совокупности близко к нормальному распределению. Это свидетельствует о том, что предлагаемая методика достаточно хорошо учитывает влияние всех факторов.

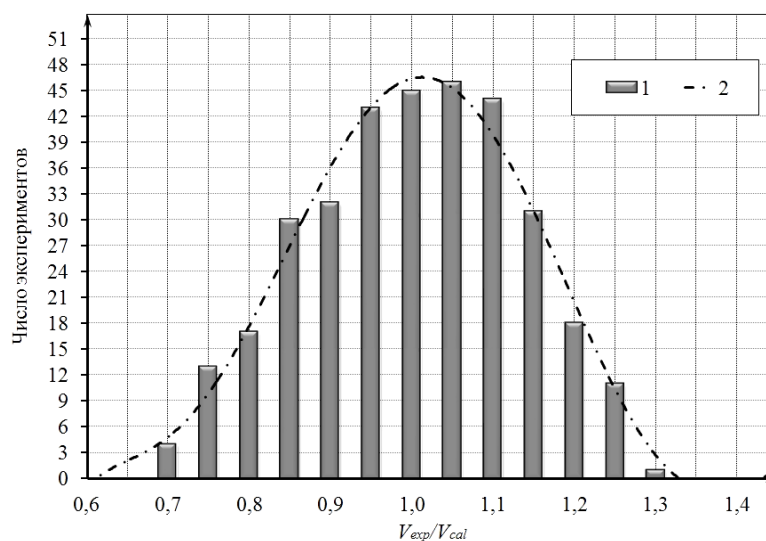


Рис. 3. Распределение отношений опытной нагрузки V_{exp} к теоретической V_{cal} для предлагаемой методики расчета и аппроксимирующая кривая.
1 – предлагаемая зависимость (4); 2 – аппроксимирующая кривая для (4)

Основные результаты оценки точности методики расчета представлены в таблице 5 и на рисунке 4. При этом для наглядности в таблице 5 также представлены значения поправки среднего значения b и коэффициента вариации величины рассеяния δ , полученные в [4], при первоначальном банке данных. На рисунке 5 представлены график отношения опытной нагрузки к теоретической в зависимости от процента армирования.

Таблица 5

Основные результаты оценки точности расчета

Параметры	Количество образцов	
	260	334
Поправка среднего значения b	1,024	0,989
Коэффициент вариации V_δ	0,144	0,129

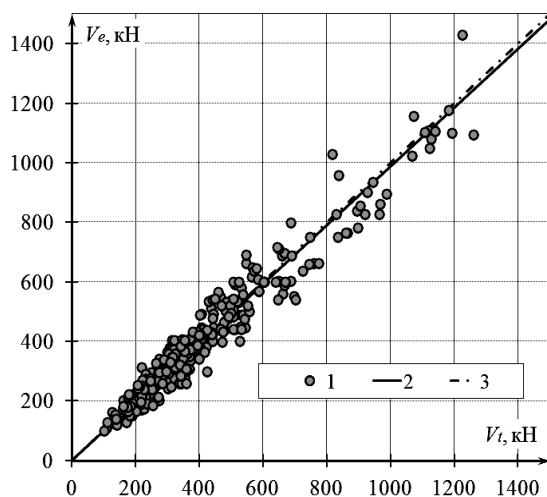


Рис. 4. Результаты сравнения экспериментальных значений несущей способности образцов V_{exp} с теоретическими по нормам [1] значениями V_{cal} :
1 – основная выборка базы данных;
2 – линия, соответствующая уравнению $V_{exp} = b \cdot V_{cal}$;
3 – линия, соответствующая равенству $V_{exp} = V_{cal}$

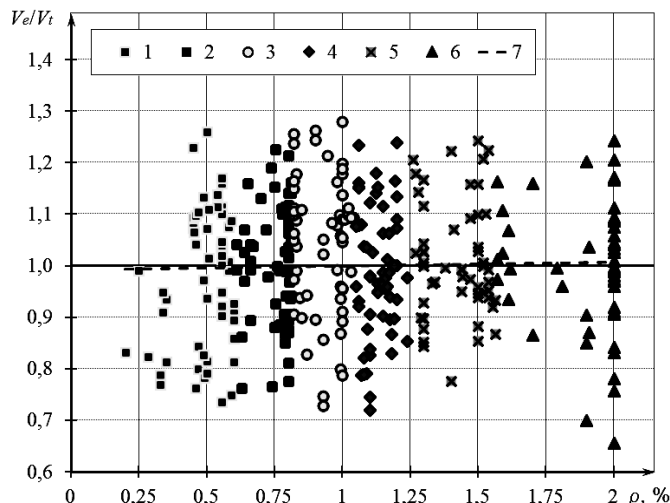


Рис. 5. Зависимость отношения экспериментальных усилий к теоретическим, рассчитанным по (4), от процента продольного армирования ρ :
1 – $\rho = 0,2 - 0,59$; 2 – $\rho = 0,6 - 0,81$; 3 – $\rho = 0,82 - 1,049$;
4 – $\rho = 1,05 - 1,25$; 5 – $\rho = 1,26 - 1,56$;
6 – $\rho = 1,57 - 2$; 7 – линия тренда

На основании представленных данных можно сделать следующий *вывод*: предлагаемая зависимость (4) дает достаточно хорошее совпадение с опытными значениями, «облако» значений располагается равномерно относительно 1 и, как видно из рисунка 5, линия тренда практически совпадает с 1.

Оценка надежности методов расчета. Оценка надежности методов расчета для норм [1; 2] была выполнена согласно [6, приложение D] с учетом изменчивости базисных переменных.

Результаты вычисления значений обеспечиваемого нормами расчета индекса надежности β приведены на рисунке 6 (для наглядности показаны только варианты вычислений при следующих исходных данных: рабочая высота сечения $d = 150$ мм; процент армирования $\rho_l = 1$ %; длина площадки нагружения $l_c = 400$ мм).

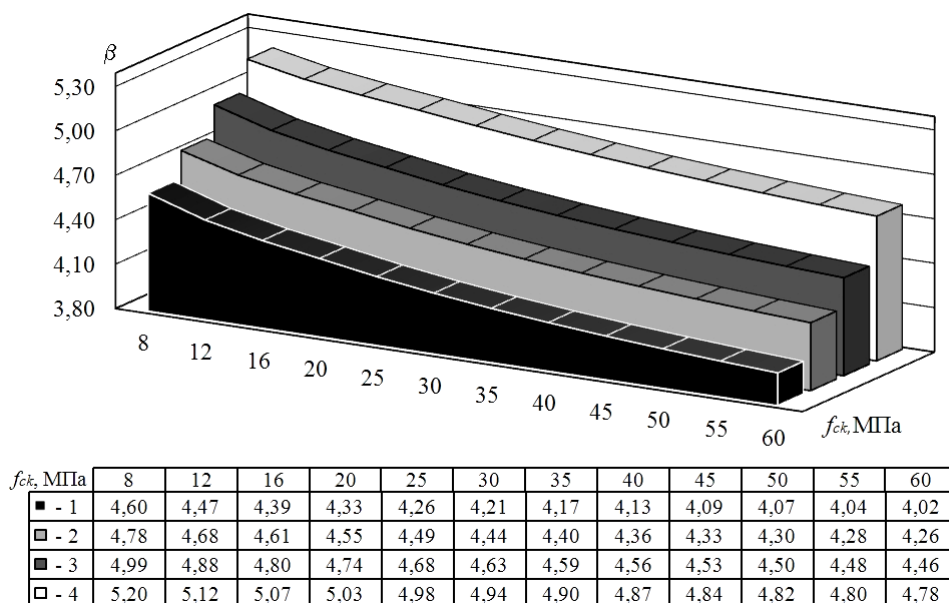


Рис. 6. Зависимость значений индекса надежности β от значений прочности бетона f_{ck} :
1 – расчет по (4); 2 – расчет по [1] при $C_{Rd,c} = 0,24$; 3 – расчет по [2]; 4 – расчет по [1]

Динамика изменения с ростом прочности бетона f_{ck} значений в определяющей степени зависит от динамики изменения значений суммарного коэффициента вариации функции сопротивления V_r , изменение значений индекса надежности β происходит нелинейно.

При расчете по методикам [1] и [2] для всего диапазона прочностей бетона наблюдается снижение значений индекса надежности.

При расчете по методике норм [1] значения β находятся в пределах 5,2 – 4,78.

При расчете по нормам [2] – в пределах 4,99 – 4,46, что указывает на чрезмерную надежность конструкций и на наличие запасов несущей способности.

При $C_{Rd,c} = 0,24$ значения индекса надежности β находятся в пределах 4,78 – 4,26, что также указывает на наличие запасов несущей способности.

При расчете по предлагаемой методике (4) для всего диапазона прочностей бетона от 8 до 25 МПа наблюдается снижение значений индекса надежности. При расчете по предлагаемой методике значения β находятся в пределах 4,6 – 4,02. Это указывает на тот факт, что предлагаемая методика также обеспечивает необходимый запас несущей способности.

Следует отметить, что по сравнению с методиками, регламентированными нормами [1] и [2], значения индекса надежности значительно меньше, что позволяет сделать *вывод* о том, что использование предлагаемой зависимости позволит снизить чрезмерные запасы несущей способности, обеспечив при этом необходимый запас при расчете железобетонных элементов на местный срез.

Заключение. С использованием дополненного (приблизительно на 30 %) банка экспериментальных данных по испытаниям на местный срез плит без поперечной арматуры, продавливаемых центрально нагруженной колонной, была выполнена оценка точности методов расчета, регламентированных нормами [1; 2], и методики расчета [1] с учетом поправок, предложенных в работе [3] согласно приложению D в [6]. Установлено, что значения b и коэффициента вариации величины рассеяния δ незначительно отличаются от значений, полученных в [3].

Установлено, что предложенная в [4] функция для учета продольного армирования позволяет обеспечить более высокую точность методики расчета железобетонных элементов при местном срезе.

Выполненная согласно положениям [6] оценка точности зависимости (3) для расчета железобетонных элементов при продавливании показала, что использование предлагаемой функции для учета продольного армирования дает хорошее совпадение с опытными значениями. Полученное значение b составляет 0,989 при коэффициенте вариации величины рассеяния δ , равном 0,129, что незначительно отличается от значений, полученных в [5].

Оценка надежности методов расчета прочности при местном срезе плит, продавливаемых центрально нагруженной колонной, показала, что представленные в нормах [1; 2] методы расчета обеспечивают излишние запасы прочности для конструкций класса надежности RC2, а предлагаемая методика не создает чрезмерных запасов прочности и обеспечивает необходимый запас несущей способности.

На основании вышесказанного можно рекомендовать использовать предлагаемую методику при разработке технических кодексов установившейся практики Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетонные и железобетонные конструкции. РУП «Стройтехнорм»: СНБ 5.03.01-02. – Минск: М-во стр-ва и архитектуры Респ. Беларусь, 2003. – 139 с.
2. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций: ТКП ЕН 1992-1-1:2009. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 207 с.
3. Рак, Н.А. Анализ методов расчета прочности элементов из тяжелого бетона без поперечной арматуры при продавливании / Н.А. Рак, С.Ю. Тамкович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2010. – № 12. – С. 64 – 72.
4. Тамкович, С.Ю. Влияние процента продольного армирования при расчетах на местный срез железобетонных элементов / С.Ю. Тамкович // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Междунар. симпоз. – Минск: Минсктиппроект, 2011. – Т. 1. – С. 367 – 374.
5. Рак, Н.А. Оценка надежности расчета железобетонных элементов при продавливании при использовании линейной зависимости для учета влияния / Н.А. Рак, С.Ю. Тамкович // Вестн. БрГТУ. – 2012. – № 1 (73): Строительство и архитектура. – С. 171 – 175.
6. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций: СТБ ЕН 1990-2007 / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2008. – 64 с.

Поступила 15.05.2012

ANALYSIS OF PRESS DURABILITY CALCULATING METHODS FOR THE ITEMS MADE FROM HEAVY CONCRETE WITHOUT CROSS-SECTION ARMATURE WITH A USE OF EXPANDED BANK OF EXPERIMENTAL DATA

N. RAK, S. TAMKOVICH

On a base of a use of expanded experimental databank it is executed the estimation of calculation accuracy for design codes operating in Belarus. The index of design reliability is determined by calculating these design codes. Based on the analysis offers on perfection of methods of punching shear strength calculation of reinforced concrete slabs are given.

УДК 624.014

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКОСТЕННОГО СТЕРЖНЯ

канд. техн. наук, доц. В.Н. КИСЕЛЕВ
(Полоцкий государственный университет)

Представлен метод расчёта тонкостенного призматического стержня открытого профиля на изгиб. Стержень расчленяется на конечное число элементарных полос и анализируется работа каждой полосы на действие нормальных и касательных сил, приложенных по кромкам полос. Результаты исследования необходимы для построения строгого решения работы тонкостенных полос, нагруженных на своих кромках, и перехода к рассмотрению местных напряжений в стержнях.

1. Общие соображения

Рассматривая решения частных случаев нагружения полосы сосредоточенными нормальными и касательными нагрузками, можно построить строгий метод определения напряженного состояния длинного тонкостенного стержня с учетом влияния характера приложенной к стержню нагрузки. Благодаря экспоненциальному закону затухания местных напряжений можно получить точное решение и для стержней конечной длины. Для таких стержней строгость решения может быть в некоторых случаях заметно нарушена лишь в ограниченной по длине стержня области, примыкающей к его торцу. Точнее, существенная неточность в значениях напряжений может наблюдаться лишь в зонах, удаленных от торцов стержня на расстояние, не превышающее половины наибольшего поперечного размера стержня, и при условии, что некоторые из внешних нагрузок приложены именно в этих зонах. Если же указанные зоны не содержат в себе внешних нагрузок, то построенное решение будет практически точно для всех точек стержня. Отметим, что такое весьма удобное положение достигается в данном случае только благодаря тому, что в вышеприведенных решениях частных задач были выделены, хотя и формально, местные напряжения, анализ которых и позволит внести указанное предложение.

Рассмотрим вопрос о принципиальной возможности построения строгого решения для тонкостенного стержня, составленного из плоских полос, на базе полученных решений частных задач о полосе. Для этого достаточно лишь знания решений о действии на кромку полосы сосредоточенных (нормальной и касательной) сил. При наличии их процесс строгого решения может быть разделен на следующие этапы:

1) заданная поперечная нагрузка на стержень (рис. 1, а) приводится к системе сил, действующих в срединных плоскостях составляющих стержень полос. При этом в общем случае в системе внешних нагрузок имеются и крутящие моменты, которые вызывают в поперечных сечениях моменты M_x (рис. 1, б);

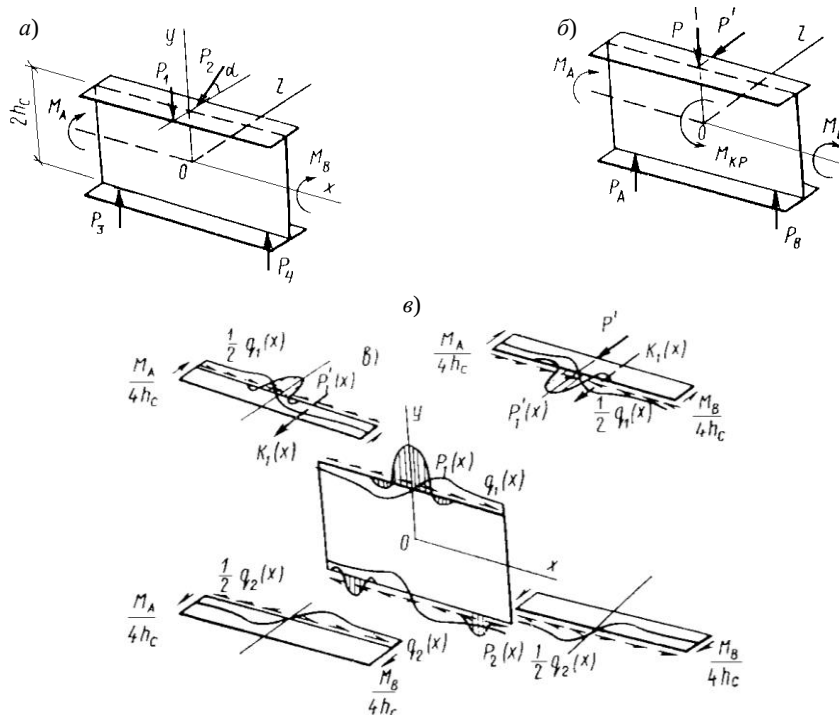


Рис. 1. Схема расчета

2) стержень расчленяется на ряд плоских полос, которые загружаются по кромкам неизвестными пока нормальными $p_i(x)$ и касательными $q_i(x)$ к последним усилиям взаимодействия (рис. 1, в);

3) составляются выражения деформаций смежных кромок полос в местах разреза, в которые войдут и функции $p_i(x)$ и $q_i(x)$;

4) приравниванием суммарных деформаций смежных кромок полос образуются $2i$ уравнений – условий неразрывности деформаций. Эти уравнения являются интегральными относительно функций $p_i(x)$ и $q_i(x)$, решение которых дает возможность найти последние.

Однако реализация указанной схемы расчета приводит к значительным математическим трудностям, связанным в первую очередь с необходимостью решения систем интегральных уравнений, которые часто имеют сингулярный характер. Поэтому, имея в виду практическое приложение, можно наметить пути преодоления этих трудностей, разумеется, без большого нарушения строгости и точности решения.

Первая из таких возможностей состоит в том, что вместо разыскания из систем интегральных уравнений функций $p_i(x)$ в случае, когда к поясам стержня приложены нормальные к ним нагрузки, или функций $q_i(x)$, когда нагрузки касательны к поясам, можно определять их на основании соответственно решения Б.М. Броуде [1]. Это вдвое уменьшает количество неизвестных функций. Вместе с тем строгость решения, по крайней мере с практической точки зрения, не уменьшается, так как вышеуказанные решения получены тем же путем – решением уравнений связности смежных кромок полос в местах разреза. Введенные при этом допущения достаточно обоснованы, а точность полученных выражений оценена сравнением.

Рассмотрим еще некоторые возможности введения дополнительных упрощений, но сначала получим выражения напряжений в полосе при характерной загрузке ее кромок нормальными давлениями по Б.М. Броуде.

2. Напряженное состояние стенки стержня от нормального давления пояса

Рассмотрим длинную полосу, к верхней кромке которой приложено нормальное давление, распределенное по закону:

$$p(\varepsilon_1) = p(0) \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} a_k \cos k\pi\varepsilon_1, \quad (1)$$

и попробуем разыскать напряжения в этой полосе с учетом местного воздействия нагрузки,

Выражение (1) легко приводится к виду

$$p(x) = 2,6\psi \frac{P}{\lambda_0} \sum_{k=1,3,5,\dots} \alpha_k \cos \frac{k\pi x}{\lambda_0}, \quad (2)$$

что будет справедливо в интервале $-\frac{\lambda_0}{2} \leq x \leq \frac{\lambda_0}{2}$.

Давлениями вне этого интервала из-за малости и незначительного влияния на напряженное состояние вблизи от сечения, в котором приложена сосредоточенная сила, пренебрежем, тем более что равнодействующая давления $p(x)$ в указанном интервале равна

$$P' = 2 \int_0^{\frac{\lambda_0}{2}} p(x) dx = 5,2\psi \cdot \frac{P}{\pi} \sum_{k=1}^7 (-1)^{\frac{k-1}{2}} \cdot \frac{\alpha_k}{k} = 1,042\psi P,$$

т.е. отличается от ψP всего лишь на 4,2 % в большую сторону.

Введем ряд (2) в формулы местных напряжений (3):

$$\begin{aligned} \sigma_x^I &= -\frac{1}{2th} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \alpha_1(\zeta - \xi, \mu) p(\xi) d\xi; \\ \sigma_y^I &= \frac{1}{2th} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \beta_1(\zeta - \xi, \mu) p(\xi) d\xi; \\ \tau_{xy}^I &= -\frac{1}{2th} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \gamma_1(\zeta - \xi, \mu) p(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь нам придется иметь дело с интегралами:

$$J_1 = \int_{-\gamma}^{\gamma} p(\xi) \cos m(x - \xi) d\xi = 2,6\psi \cdot \frac{P}{\lambda_0} \sum \alpha_k \int_{-\gamma}^{\gamma} \cos k_1 \xi \cos m(x - \xi) d\xi;$$

$$J_2 = \int_{-\gamma}^{\gamma} p(\xi) \sin m \cdot (x - \xi) d\xi = 2,6\psi \frac{P}{\lambda_0} \sum \alpha_k \int_{-\gamma}^{\gamma} \cos k_1 \xi \sin m(x - \xi) d\xi,$$

где обозначено $\gamma = \frac{\lambda_0}{2}$; $k_1 = \frac{k\pi}{\lambda_0}$; $k = 1, 3, 5, 7 \dots$

Получаем

$$\int_{-\gamma}^{\gamma} \cos k_1 \xi \cos m(x - \xi) d\xi = \cos mx \int_{-\gamma}^{\gamma} \cos k_1 \xi \cos m\xi d\xi + \sin mx \int_{-\gamma}^{\gamma} \cos k_1 \xi \sin m\xi d\xi,$$

второй интеграл правой части имеет нечетную подынтегральную функцию, поэтому равен нулю, а первый – четную, и равен (без множителя $\cos mx$)

$$2 \int_0^{\gamma} \cos k_1 \xi \cos m\xi d\xi = \frac{\sin(k_1 + m)\gamma}{k_1 + m} + \frac{\sin(k_1 - m)\gamma}{k_1 - m} = \frac{2k_1 \sin k_1 \gamma \cos m\gamma - 2m \cos k_1 \gamma \sin m\gamma}{k_1^2 - m^2} = \frac{2\pi\lambda_0(-1)^{\frac{k-1}{2}} k \cos \frac{m\lambda_0}{2}}{k^2\pi^2 - \lambda_0^2 m^2},$$

так как при k нечетном

$$\cos k_1 \gamma = \cos \frac{k\pi}{2} = 0; \quad \sin k_1 \gamma = \sin \frac{k\pi}{2} = (-1)^{\frac{k-1}{2}}.$$

Аналогично получим

$$\int_0^{\gamma} \cos k_1 \xi \cos m(x - \xi) d\xi = \frac{2\pi\lambda_0(-1)^{\frac{k-1}{2}} k \cos \frac{m\lambda_0}{2}}{k^2\pi^2 - \lambda_0^2 m^2} \cdot \sin mx.$$

Таким образом,

$$J_1 = 5,2\psi\pi P \cos mx \cos \frac{m\lambda_0}{2} \sum_{k=1,3,5,\dots} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\alpha_k k}{(k\pi)^2 - (m\lambda_0)^2};$$

$$J_2 = 5,2\psi\pi P \sin mx \cos \frac{m\lambda_0}{2} \sum_{k=1,3,5,\dots} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\alpha_k k}{(k\pi)^2 - (m\lambda_0)^2}.$$

Переходя к относительным координатам $\zeta = x/h$, $\mu = y/h$ и новой переменной интегрирования $z = mh$ и подставляя полученные выражения в формулы (3), получим местные напряжения:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_x &= \alpha_6(\zeta, \mu, \chi) \frac{\psi P}{2th}; \\ \sigma'_y &= \beta_6(\zeta, \mu, \chi) \frac{\psi P}{2th}; \\ \tau'_{xy} &= \gamma_6(\zeta, \mu, \chi) \frac{\psi P}{2th}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где (для упрощения записи опустим обозначения аргументов)

$$\left. \begin{aligned} \alpha_6 &= 5,2 \sum_{k=1,3,5,\dots} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \alpha_k k \int_0^{\infty} \left[G_1(z, \mu) + G_2(z, \mu) + \frac{3\mu}{2z^2} \right] \cos z\zeta \cos z\chi \frac{dz}{(k\pi)^2 - (2z\chi)^2}; \\ \beta_6 &= -5,2 \sum_{k=1,3,5,\dots} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \alpha_k k \int_0^{\infty} [G_3(z, \mu) + G_4(z, \mu)] \cos z\zeta \cos z\chi \frac{dz}{(k\pi)^2 - (2z\chi)^2}; \\ \gamma_6 &= 5,2 \sum_{k=1,3,5,\dots} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \alpha_k k \int_0^{\infty} \left[G_5(z, \mu) + G_6(z, \mu) + \frac{3\mu}{4z^2} - \frac{3}{4z} \right] \cos z\zeta \cos z\chi \frac{dz}{(k\pi)^2 - (2z\chi)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\chi = \frac{\lambda_0}{2h},$$

а величины $G_i(z, \mu)$ выражаются формулами:

$$\begin{aligned} G_1(z, \mu) &= \frac{(z \operatorname{sh} z - \operatorname{ch} z) \operatorname{sh} \mu z - \mu z \operatorname{ch} z \operatorname{ch} \mu z}{\operatorname{sh} 2z - 2z}; & G_2(z, \mu) &= \frac{(z \operatorname{ch} z - \operatorname{sh} z) \operatorname{ch} \mu z - \mu z \operatorname{sh} z \operatorname{sh} \mu z}{\operatorname{sh} 2z + 2z}; \\ G_3(z, \mu) &= \frac{(z \operatorname{sh} z + \operatorname{ch} z) \operatorname{sh} \mu z - \mu z \operatorname{ch} z \operatorname{ch} \mu z}{\operatorname{sh} 2z - 2z}; & G_4(z, \mu) &= \frac{(z \operatorname{ch} z + \operatorname{sh} z) \operatorname{ch} \mu z - \mu z \operatorname{sh} z \operatorname{sh} \mu z}{\operatorname{sh} 2z + 2z}; \\ G_5(z, \mu) &= \frac{z \operatorname{sh} z \operatorname{ch} \mu z - \mu z \operatorname{ch} z \operatorname{sh} \mu z}{\operatorname{sh} 2z - 2z}; & G_6(z, \mu) &= \frac{z \operatorname{ch} z \operatorname{sh} \mu z - \mu z \operatorname{sh} z \operatorname{ch} \mu z}{\operatorname{sh} 2z + 2z}. \end{aligned} \quad (6)$$

Все интегралы правых частей (5) сходятся, за исключением интегралов в выражениях α_6 и β_6 при $\mu=1$. Поэтому, выделяя расходящиеся части, получим для $\mu=1$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_6 &= -\frac{2,6}{2\chi} \sum_{k=1,3,5,\dots} \alpha_k \cos \frac{k\pi\xi}{2\chi} - 5,2 \sum_{k=1,2,3,\dots} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \alpha_k k \cdot \int_0^\infty \left[\frac{8z^2}{\operatorname{sh}^2 2z - 4z^2} - \frac{3}{2z^2} \right] \frac{\cos z\xi \cos z\chi dz}{(k\pi)^2 - 4z^2 \chi^2}; \\ \beta_6 &= -\frac{2,6}{2\chi} \sum_{k=1,3,5,\dots} \alpha_k \cos \frac{k\pi\xi}{2\chi}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$\chi = 0,25$.

На рисунке 2 представлены характерные эпюры местных напряжений для одного из значений параметра χ .

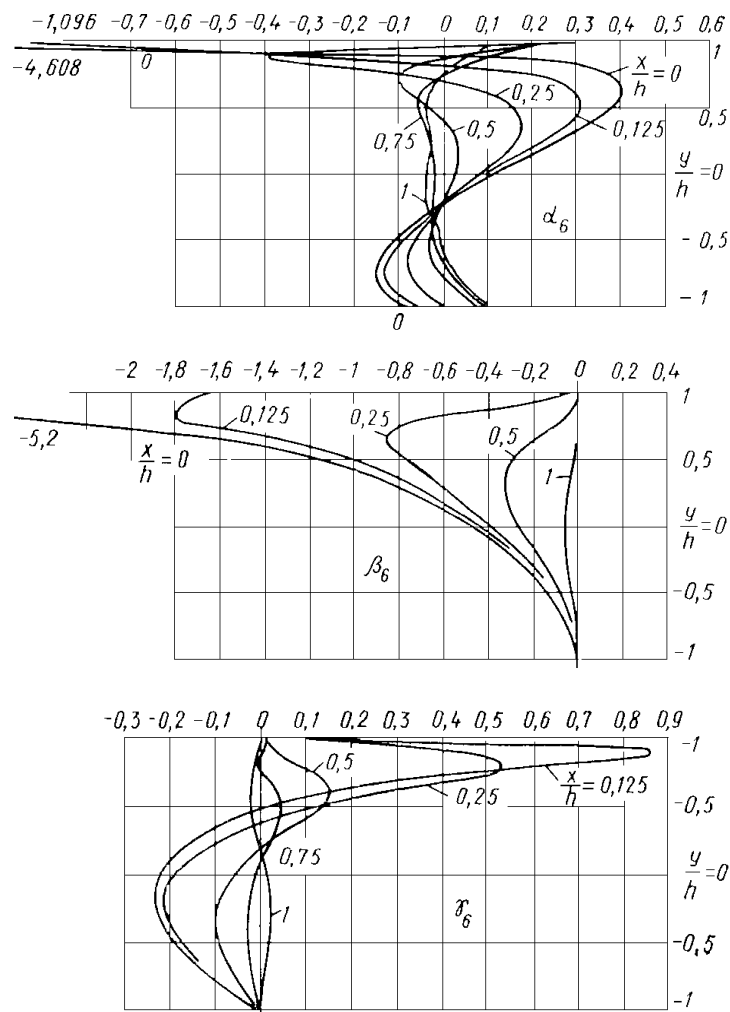


Рис. 2. Характерные эпюры местных напряжений для параметра χ

3. Касательные усилия взаимодействия в тавре

Нормальные усилия взаимодействия полос стержня при действии на его пояс нормальной к нему сосредоточенной силы достаточно точно определяются решением (2). В случае же действия на пояс касательной сосредоточенной силы с такой же степенью точности могут быть определены на основании решений [1] касательные усилия взаимодействия полос.

Возникает вопрос, каким образом будут распределяться на кромках полос касательные усилия взаимодействия в первом случае и нормальные во втором. Очевидно, что их распределение должно находиться в определенном соответствии с законом распределения уже известных усилий взаимодействия (1) или

$$q_1(x) = \frac{4q}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\rho_n + d_{2n})d_{1n} \sin \theta_n \cos[(2n-1)\varepsilon]}{[(\rho_n + d_{1n}) \cdot (\rho_n + d_{2n}) - \eta_n^2] \cdot (2n-1)};$$

$$q_2(x) = \frac{4q}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\eta_n d_{1n} \sin \theta_n \cos[(2n-1)\varepsilon]}{[(\rho_n + d_{1n}) \cdot (\rho_n + d_{2n}) - \eta_n^2] \cdot (2n-1)}.$$
(8)

Вначале попробуем разыскать касательные усилия взаимодействия пояса и стенки стержня, несущего нормальную к его продольной оси сосредоточенную нагрузку. Ввиду того, что в общем виде (для произвольного стержня) эта задача не может быть решена, а может быть указан лишь принципиальный ход ее решения, рассмотрим определенное поперечное сечение. Пусть это будет тавр, представленный на рисунке 3.

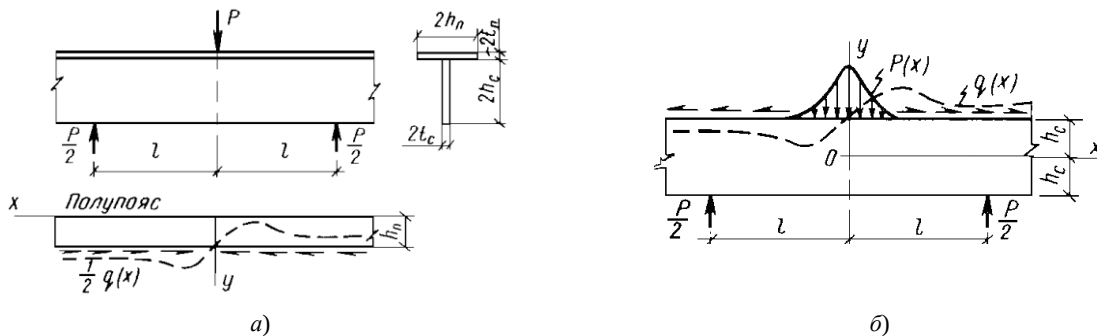


Рис. 3. Поперечное сечение (тавр)

Полагая, что $l > 2h$ и что поэтому в зоне $|x| < l - h$ «опорные» сосредоточенные силы по $P/2$ не вызывают местных напряжений, отделим пояс от стенки и представим схему нагружения стенки и полупоясов, как это показано на рисунке 3, б. Причем нормальные давления $p(x)$ считаем известными, вычисляемыми по (1). Используем условия связности деформаций элементов стержня в местах разреза.

1. Увеличенная в E (модуль упругости) раз продольная деформация кромки полупояса в местах разреза имеет значение

$$E\varepsilon_{xn} = \frac{1}{2\pi t_n} \int_0^{\infty} H_1(m, h_n) \cos mx dm \int_0^{\infty} q(\xi) \sin m\xi d\xi,$$

где $H_1(m, h_n) = G_{13}(m, h_n) - \frac{1}{mh_n} + \nu G_{14}(m, h_n)$; ν – коэффициент Пуассона.

2. Напряжения в стенке будут складываться:

- из элементарных напряжений

$$\sigma_x^0 = \frac{M}{J_c}; \quad \sigma_y^0 = 0,$$

- из напряжений, вызванных нагрузкой $p(x)$ на кромке

$$\sigma_x^p = \alpha_6 \frac{P}{2t_c h_c}; \quad \sigma_y^p = \beta_6 \frac{P}{2t_c h_c},$$

- из напряжений, вызванных неизвестными пока касательными усилиями взаимодействия $q(x)$.

Последние напряжения можно представить в следующем виде:

$$\sigma_x^q = -\frac{1}{\pi t_c} \int_0^\infty \left[G_7(m, y) + G_8(m, y) + \frac{3y + h_c}{2mh_c^2} \right] \cos mx dm \int_0^\infty q(\xi) \sin m\xi d\xi;$$

$$\sigma_y^q = -\frac{1}{\pi t_c} \int_0^\infty [G_9(m, y) + G_{10}(m, y)] \cos mx dm \int_0^\infty q(\xi) \sin m\xi d\xi.$$

Тогда увеличенная в E раз продольная деформация верхней кромки стенки будет такой:

$$E\varepsilon_{xc} = \frac{3M}{4t_c h_c^2} + \int_0^\infty R_1(m, h_c) \cos mx dm - \frac{1}{\pi t_c} \int_0^\infty H_2(m, h_c) \cos mx dm \int_0^\infty q(\xi) \sin m\xi d\xi,$$

где

$$R_1(m, h_c) = \frac{2,6P}{t_c} \sum_{k=1,3,5} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \left[G_1(m, h_c) + G_2(m, h_c) + \frac{3}{2m^2 h_c^2} + \nu G_3(m, h_c) + \nu G_4(m, h_c) \right] \cos \frac{m\lambda_0}{2} \cdot \frac{\alpha_k k}{(k\pi)^2 - (\lambda_0 m)^2};$$

$$H_2(m, h_c) = G_7(m, h_c) + G_8(m, h_c) + \nu G_9(m, h_c) + \nu G_{10}(m, h_c) + \frac{2}{mh_c}.$$

Приравнявая $E\varepsilon_{xp}$ и $E\varepsilon_{xc}$, получим

$$\int_0^\infty H(m) \cos mx dm \int_0^\infty q(\xi) \sin m\xi d\xi = \frac{3M}{4t_c h_c^2} + \int_0^\infty R_1(m) \cos mx dm,$$

где

$$H(m) = \frac{1}{2\pi t_n} H_1(m, h_n) + \frac{1}{\pi t_c} H_2(m, h_c).$$

Представим изгибающий момент

$$M = M(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } |x| > l, \\ -\frac{P}{2}(l - |x|) & \text{при } 0 < |x| < l \end{cases}$$

интегралом Фурье.

Учитывая четность по x функции $M(x)$, будем иметь:

$$M(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \cos mx dm \int_0^\infty M(t) \cos mtdt = -\frac{P}{\pi} \int_0^\infty \cos mx dm \int_0^\infty (l - t) \cos mtdt = \frac{P}{\pi} \int_0^\infty \frac{(\cos ml - 1) \cos mx}{m^2} dm.$$

Тогда, обозначив

$$R(m) = R_1(m, h_c) + \frac{3P}{4\pi t_c h_c^2} \frac{\cos ml - 1}{m^3},$$

можем написать

$$\int_0^\infty H(m) \cos mx dm \int_0^\infty q(\xi) \sin m\xi d\xi = \int_0^\infty R(m) \cos mx dm.$$

Это равенство может быть удовлетворено, в частности, если равны подынтегральные функции. Отсюда получим интегральное уравнение

$$\int_0^\infty q(\xi) \sin m\xi d\xi = \frac{R(m)}{H(m)}. \quad (9)$$

Для его решения умножим обе части на $\sin(mx)$ и проинтегрируем от 0 до ∞ .

Будем иметь:

$$\int_0^{\infty} \sin mx dm \int_0^{\infty} q(\xi) \sin m\xi d\xi = \int_0^{\infty} \frac{R(m)}{H(m)} \sin mx dm.$$

Применяя теперь к левой части синус-преобразования Фурье

$$f(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \sin mx dm \int_0^{\infty} f(t) \sin mt dt,$$

получим окончательно

$$q(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(m)}{H(m)} \sin mx dm. \quad (10)$$

Положив для определенности $t_c = t_n = t$, $h_c = 2h_n = h$, $h = 50t$, $\nu = 0,3$, перейдем к относительным координатам ξ и μ , новой переменной интегрирования $z = mh$ и обозначениям параметров стержня

$$\eta = \frac{l}{h}; \quad \chi = \frac{\lambda_0}{2h}.$$

Тогда после некоторых преобразований выражение (10) получает вид:

$$q(\zeta h) = \frac{6P}{\pi h} \cdot \int_0^{\infty} \frac{\cos z\eta - 1}{4z^2} - \frac{0,867\pi \left[\frac{sh^2 2z + 4z^2}{sh^2 2z - 4z^2} - 0,3 \right] \cos z\chi \sum \frac{(-1)^{k-1} \alpha_k k}{(k\pi)^2 - (m\lambda_0)^2}}{\frac{0,845z^2 - 0,245sh^2 z + 2ch^2 z}{sh^2 2z - 4z^2} - \frac{sh4z - 4z}{sh^2 2z - 4z^2}} \sin z\zeta dz. \quad (11)$$

Численное интегрирование этого выражения, выполненное для случая $2h = 1000$ мм, $2l = 12$ м, приводит к эпюре касательных усилий $q(x)^*$, представленной на рисунке 4.

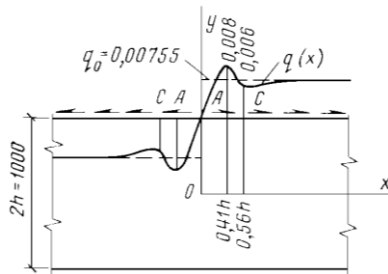


Рис. 4. Эпюра касательных усилий

Из рисунка видно, что заметное отличие в распределении касательных усилий $q(x)$ взаимодействия пояса и стенки тавра по (11) от определяемых формулой Д.И. Журавского

$$q_0 = \frac{QS_n^{omc}}{J} = \pm 0,00755 \frac{P}{2t}$$

наблюдается в ограниченной области, занимающей вдоль стержня примерно по $0,6h$ в каждую сторону от сечения, в котором приложена внешняя сосредоточенная сила. Пиковое значение усилий $q(x)$, развивающихся в сечении, отстоящем от сосредоточенной силы на расстоянии $0,41h$, отличается от элементарного на $8,5\%$.

4. Касательные усилия взаимодействия в двутавре

Рассмотрим длинную двутавровую балку, нагруженную по схеме, представленной на рисунке 5, а. По-прежнему будем считать, что $l > 2h$ и что поэтому в зоне $|x| \leq l - h$ можно не учитывать влияния местных напряжений от «опорных» сосредоточенных сил. Отрезая полупояса от стенки, получим схему их нагружения, представленную на рисунке 5, б.

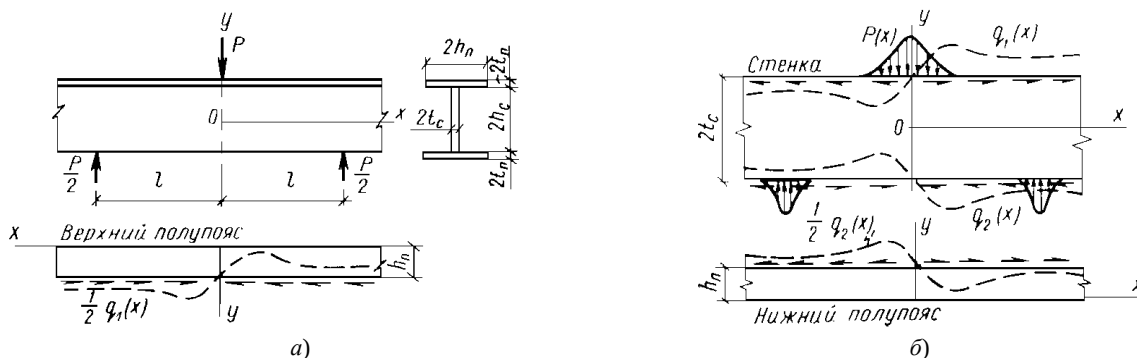


Рис. 5. Схема нагружения двутавровой балки

Нормальные давления $p(x)$ опять считаем известными, а для определения касательных составим два условия связности деформаций в местах разрезов.

1. Для верхней, например, кромки стенки будем иметь

$$E\varepsilon_x = E\varepsilon_{xp} + E\varepsilon_{xq},$$

где увеличенная в E раз деформация кромки соответственно от давлений $p(x)$ и $q(x)$ выражается так:

$$E\varepsilon_{xp} = \sigma_{xp}^0 + \sigma'_{xp} - \nu\sigma'_{yp};$$

$$E\varepsilon_{xq} = \sigma_{xq_1}^0 + \sigma'_{xq_1} + \sigma_{xq_2}^0 + \sigma'_{xq_2},$$

причем учтено, что касательные давления не вызывают на кромках напряжений σ_y .

Так, давления $q_i(x)$, очевидно, самоуравновешены на каждой кромке, можем записать:

$$\sigma_{xq_i} = \sigma_{xq_i}^0 + \sigma'_{xq_i} = -\frac{1}{\pi t_c} \int_0^\infty [G_7(m, \pm h_c) + G_8(m, \pm h_c)] \cos mx dm \int_0^\infty q_i(\xi) \sin m\xi d\xi,$$

где верхние знаки соответствуют значению $i = 1$, нижние $i = 2$.

Элементарное напряжение σ_{xp}^0 после представления изгибающего момента интегралом Фурье будет

$$\sigma_{xp}^0 = -\frac{3P}{4\pi t_c h_c^2} \int_0^\infty \frac{(\cos ml - 1) \cos mx}{m^2} dm,$$

а σ'_{xp} и σ'_{yp} выражается по-прежнему через безразмерные напряжения α_6 и β_6 .

Аналогичные выражения можно записать и для нижней кромки стенки.

2. Для полупоясов будем иметь

$$E\varepsilon_{xn} = \frac{1}{2\pi t_n} \int_0^\infty [G_{13}(m, \pm h_n) + \nu G_{14}(m, \pm h_n)] \cos mx dm \int_0^\infty q_i(\xi) \sin m\xi d\xi.$$

Используя методику, изложенную в предыдущем пункте, и приравнявая выражения деформаций кромок стенки и соответствующих полупоясов, получим два уравнения связности деформаций:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty H(m) \cos mx dm \int_0^\infty [4q_1(\xi) - q_2(\xi)] \sin m\xi d\xi &= \int_0^\infty R(m) \cos mx dm; \\ \int_0^\infty H_1(m) \cos mx dm \int_0^\infty q_1(\xi) \sin m\xi d\xi + \int_0^\infty H_2(m) \cos mx dm \int_0^\infty q_2(\xi) \sin m\xi d\xi &= \int_0^\infty R_1(m) \cos mx dm, \end{aligned} \quad (12)$$

$$H(m) = \frac{1}{\pi t_c} [G_7(m, h_c) + G_8(m, h_c) + \nu G_9(m, h_c) + \nu G_{10}(m, h_c) -$$

где

$$-G_7(m, -h_c) - G_8(m, -h_c)] + \frac{1}{2\pi t_n} [G_{13}(m, h_n) + \nu G_{14}(m, h_n)];$$

$$\begin{aligned} R(m) &= \frac{2,6P}{t_c} \sum_{k=1,3,5} (-1)^{\frac{k-1}{2}} [G_1(m, h_c) + G_2(m, h_c) + \frac{3}{2m^2 h_c^2} + \nu G_3(m, h_c) + \\ &+ \nu G_4(m, h_c)] \cdot \cos\left(\frac{m\lambda_0}{2}\right) \frac{\alpha_k k}{(k\pi)^2 - (\lambda_0 m)^2} + \frac{3}{4\pi t_c h_c^2} \cdot \frac{\cos ml - 1}{m^2}. \end{aligned}$$

Остальные обозначения для сокращения места пока не выписываем.

Первое уравнение (12) удовлетворится, в частности, если равны подынтегральные функции. Это условие дает равенство:

$$\int_0^\infty q_2(\xi) \sin m\xi d\xi = 4 \int_0^\infty q_1(\xi) \sin m\xi d\xi - \frac{R(m)}{H(m)}.$$

Подставляя последнее равенство во второе уравнение (12) и используя аналогичное условие, получим интегральное уравнение относительно одной из искомых функций:

$$\int_0^\infty q_1(\xi) \sin m\xi d\xi = \frac{R_2(m)}{H_2(m)}, \quad (13)$$

где

$$H_2(m) = -\frac{1}{\pi t_n} [G_7(m, -h) + G_8(m, -h)] + \frac{1}{\pi t_c} [4G_7(m, h_c) + 4G_8(m, h_c) + \nu G_9(m, h_c) + \nu G_{10}(m, h_c)] +$$

$$+ \frac{2}{\pi t_n} [G_{13}(m, h_n) + \nu G_{14}(m, h_n)];$$

$$R_2(m) = \frac{2,6P}{t_c} \sum_{k=1,3,5} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \left[G_1(m, -h_c) + G_2(m, -h_c) + \frac{3}{2m^2 h_c^2} \right] \cos\left(\frac{m\lambda_0}{2}\right) \cdot \frac{\alpha_k k}{(k\pi)^2 - (\lambda_0 m)^2} + \frac{3P}{4t_c h_c^2} \cdot \frac{\cos ml - 1}{m^2} -$$

$$- \frac{1}{\pi t_c} \left\{ \frac{[G_7(m, h_c) + G_8(m, h_c) + \nu G_9(m, h_c) + \nu G_{10}(m, h_c)]R(m)}{H(m)} \right\} - \frac{1}{2\pi t_n} \left\{ \frac{[G_{13}(m, h_n) + \nu G_{14}(m, h_n)]R(m)}{H(m)} \right\}.$$

Для решения уравнения (13) умножим обе его части на $\sin(mx)$ и проинтегрируем в пределах от 0 до ∞ :

$$\int_0^\infty \sin mx dm \int_0^\infty q_1(\xi) \sin m\xi d\xi = \int_0^\infty \frac{R_2(m)}{H_2(m)} \sin mx dm.$$

Применяя теперь к левой части синус-преобразования Фурье, получим окончательно

$$q_1(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{R_2(m)}{H_2(m)} \sin mx dm. \quad (14)$$

Аналогично найдем и вторую искомую функцию

$$q_2(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \left[\frac{4R_2(m)}{H_2(m)} - \frac{R(m)}{H(m)} \right] \sin mx dm. \quad (15)$$

Положив для определенности $t_c = t_n = t$, $h_c = 2h_n = h$, $h = 50t$, $\nu = 0,3$, получим из (14)

$$q_1(\zeta h) = \frac{8P}{\pi t h} \int_0^\infty 2,6 \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{(-1)^{\frac{k-1}{2}} \alpha_k k}{(k\pi)^2 - (m\lambda_0)^2} + \left[\frac{sh^2 2z + 4z^2}{sh^2 2z - 4z^2} - \frac{0,245sh^2 z + 6ch^2 z + 2,35z^2}{(sh2z - 2z)(sh^2 2z - 4z^2)} - 0,3 \right] \cos z\chi \cdot \sin z\zeta dz \quad (16)$$

$$\frac{(sh4z - 4z)}{(sh2z - 2z)(sh^2 4z - 4z^2)} - \frac{2(\cos z\eta - 1)}{4z^2}$$

и из (15)

$$q_1(\zeta h) = \frac{6P}{\pi t h} \int_0^\infty \frac{\frac{3(\cos z\eta - 1)}{4z^2} - \left\{ \frac{3,215sh^2 z + 2ch^2 z + 4z^2}{(sh2z - 2z)(sh^2 2z - 4z^2)} - 0,3 \right\} \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{(-1)^{\frac{k-1}{2}} \alpha_k k}{(k\pi)^2 - (m\lambda_0)^2} \sin z\chi}{\frac{3}{2z} - \frac{\cos z\eta - 1}{4z^2} + \frac{(sh4z - 4z)(4z^2 + sh^2 2z + chz)}{sh^2 2z - 4z^2}} \cdot \sin z\zeta dz. \quad (17)$$

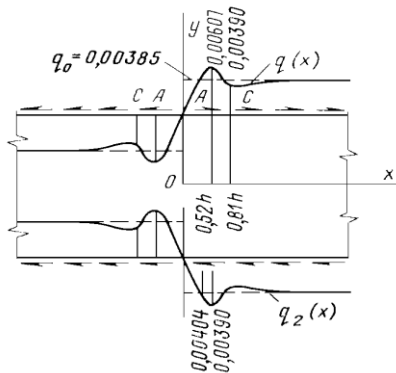


Рис. 6. Касательные усилия взаимодействия поясов и стенки двутавра

На рисунке 6 представлены графики касательных усилий взаимодействия поясов и стенки двутавра, имеющего пролет $2l = 12$ м и размеры сечения: стенки 1000×10 мм, пояса 500×10 мм. Значения давлений $q(x)$ даны в долях $P/2t$. Для сравнения приведена также эпюра элементарных касательных давлений q_0 , по Д.И. Журавскому.

В данном случае разница между пиковым значением давления $q_1(x)$ со стороны загруженной полки и его элементарной величиной $q_0 = 0,00385 (P/2t)$ составляет 57,4 %, а зона их заметного расхождения простирается примерно на $0,8h$ в каждую сторону от сечения, в котором приложена сосредоточенная сила. В то же время отличие давления $q_2(x)$ от элементарного невелико, но в некоторых случаях может иметь принципиальное значение.

Анализ ряда примеров, преимущественно для стержневых двутавровых поперечных сечений, показал, что хорошую аппроксимацию разностей (см. рис. 6)

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_1(x) &= q_1(x) - q_{01}(x); \\ \bar{q}_2(x) &= q_2(x) - q_{02}(x) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

уточненных и элементарных касательных давлений со стороны загруженного и свободного от нагрузки поясов можно получить с помощью функций

$$\begin{aligned} \bar{q}_1(x) &= \Delta q_{01}(1, 4 \cdot \sin k_1 |\zeta| - 1) & \text{при } |\zeta| \leq 0,107\chi_1^{-1}; \\ \bar{q}_1(x) &= 0 & \text{при } |\zeta| > 0,107\chi_1^{-1}; \\ \bar{q}_2(x) &= \Delta q_{02}(1, 05 \cdot \sin k_2 |\zeta| - 1) & \text{при } |\zeta| \leq 0,04\chi_2^{-1}; \\ \bar{q}_2(x) &= 0 & \text{при } |\zeta| > 0,04\chi_2^{-1}, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\Delta q_{0i} = \frac{q_{0in} - q_{0iz}}{2} \operatorname{sign} \zeta, \\ k_1 = \frac{\pi\chi_1}{0,142}; \quad k_2 = \frac{\pi\chi_2}{0,04},$$

причем функции элементарных касательных усилий $q_{0i}(x)$, а также значения этих элементарных усилий слева (q_{0iz}) и справа (q_{0in}) от сосредоточенной силы входят сюда со своими знаками.

Таким образом, для областей, в которых касательные усилия взаимодействия $q_i(x)$ отличаются от элементарных значений, они могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} q_1(x) &= \Delta q_{01}(1, 4 \cdot \sin k_1 |\zeta| - 1) + q_{01}(x); \\ q_2(x) &= \Delta q_{02}(1, 5 \cdot \sin k_2 |\zeta| - 1) + q_{02}(x). \end{aligned} \quad (20)$$

Из (19) следует, что «всплеск» касательных усилий взаимодействия в месте разрыва функций $q_{0i}(x)$ обуславливается только скачком элементарных касательных усилий под грузом, но не абсолютной величиной этих усилий, от которой он не зависит.

5. Напряжения в стенке двутавра от касательных усилий взаимодействия

Рассмотрим длинную полосу, верхняя кромка которой на участке $-l \leq x \leq l$ ($l > h$) загружена касательным давлением. Используя формулы

$$\sigma'_x = \alpha_2(\zeta, \mu) \frac{T}{2th}; \quad \sigma'_y = \beta_2(\zeta, \mu) \frac{T}{2th}; \quad \tau'_{xy} = \gamma_2(\zeta, \mu) \frac{T}{2th} \quad (21)$$

как функции влияния напряжений и применяя к ним формулу Грина, будем иметь, например, для нормального напряжения

$$\alpha'_4 \frac{1}{2th} = \frac{1}{2th} \int_0^\infty \left[G_7(z, \mu) + G_8(z, \mu) + \frac{1+3\mu}{2z} \right] \cdot \int_{-\eta}^\eta q_1(\xi) \cdot \sin[z(\zeta - \xi)] d\xi dz, \quad (22)$$

где по-прежнему

$$\eta = l/h.$$

Вычислим с помощью аппроксимации (19) добавки $\Delta\alpha_4$, $\Delta\beta_4$, $\Delta\gamma_4$, которые следует наложить на безразмерные напряжения α_4 , β_4 , γ_4 для получения напряжений в полосе (стенке) от загрузки ее верхней кромки уточненными касательными давлениями $q_1(x)$.

Применяя формулу Грина к (21) с учетом (19), получим для первого нормального напряжения

$$\alpha_4 \frac{1}{2th} = \frac{1}{2\pi t} \int_0^\infty \left[G_7(z, \mu) + G_8(z, \mu) + \frac{1+3\mu}{2z} \right] \int_{-\xi_c}^{\xi_c} \bar{q}(\xi) \cdot \sin[z(\zeta - \xi)] d\xi dz,$$

где $\xi_c = 0,107\chi_1^{-1}$.

Так как функция $\bar{q}(x)$ нечетна по x , то последний член подынтегральной функции в этом выражении можно записать так:

$$\frac{1+3\mu}{2} \int_0^{\infty} \frac{1}{z} \int_{-\zeta_c}^{\zeta_c} \bar{q}(\xi) \sin[z(\zeta-\xi)] d\xi dz = -(1+3\mu) \left[\int_0^{\zeta_c} \bar{q}(\xi) d\xi + \int_{\zeta_c}^{\infty} \bar{q}(\xi) d\xi \right] \int_0^{\infty} \frac{\cos z\zeta \sin z\zeta}{z} dz.$$

Учитывая только что приводившиеся выше значения последнего несобственного интеграла, получим опять, что

$$\int_0^{\zeta_c} \bar{q}(\xi) d\xi \int_0^{\infty} \frac{\cos z\zeta \sin z\zeta}{z} dz = 0,$$

так как здесь $\xi < \zeta$, а

$$-(1+3\mu) \int_{\zeta_c}^{\infty} \bar{q}(\xi) d\xi \int_0^{\infty} \frac{\cos z\zeta \sin z\zeta}{z} dz = -\frac{1+3\mu}{2} \pi \int_{\zeta_c}^{\infty} \bar{q}(\xi) d\xi.$$

Нетрудно проверить, что полученное выражение дает напряжение

$$\Delta\sigma_x^0 = -\frac{h+3y}{4th} \int_{\zeta_c}^{\infty} \bar{q}(\xi) d\xi = -\left(\frac{N}{F} + \frac{M}{J} y \right),$$

где

$$N = h \int_{\zeta_c}^{\infty} \bar{q}(\xi) d\xi; \quad M = h^2 \int_{\zeta_c}^{\infty} \bar{q}(\xi) d\xi$$

представляют собой взятые с обратным знаком нормальную силу и изгибающий момент в полосе от нагрузки $\bar{q}(x)$, распределенной на участке $[-\zeta_c; \zeta_c]$ ее кромки.

Следовательно, напряжение $\Delta\sigma_x^0$ есть взятое с обратным знаком элементарное напряжение в полосе от той же нагрузки и исключение его из выражения местных напряжений равноценно наложению на последние соответствующих напряжений, т.е. переходу к полным напряжениям.

Таким образом, выполнив теперь внутренние квадратуры в записанных через формулу Грина выражениях безразмерных напряжений, получим окончательно

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha_4 &= -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} [G_7(z, \mu) + G_8(z, \mu)] F(z, \chi) \cos z\zeta dz; \\ \Delta\beta_4 &= -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} [G_9(z, \mu) + G_{10}(z, \mu)] F(z, \chi) \cos z\zeta dz; \\ \Delta\gamma_4 &= -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} [G_{11}(z, \mu) + G_{12}(z, \mu)] F(z, \chi) \cos z\zeta dz, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где

$$F(z, \chi) = \frac{z \cos 0,107 \frac{z}{\chi} + 22\chi \sin 0,107 \frac{z}{\chi}}{50\pi^2 \chi - z^2} - \frac{1}{z} \left(1 - \cos 0,107 \frac{z}{\chi} \right).$$

Добавочные же напряжения, вызванные всплеском касательных усилий взаимодействия на верхней кромке стенки, получают значения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_x &= \Delta\alpha_4 \frac{q_{0t}}{2t}; \\ \Delta\sigma_y &= \Delta\beta_4 \frac{q_{0t}}{2t}; \\ \Delta\tau_{xy} &= \Delta\gamma_4 \frac{q_{0t}}{2t}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

При этом очевидно, что они не зависят от протяженности распределенных касательных усилий q_0 , так как параметр η не входит в их выражения.

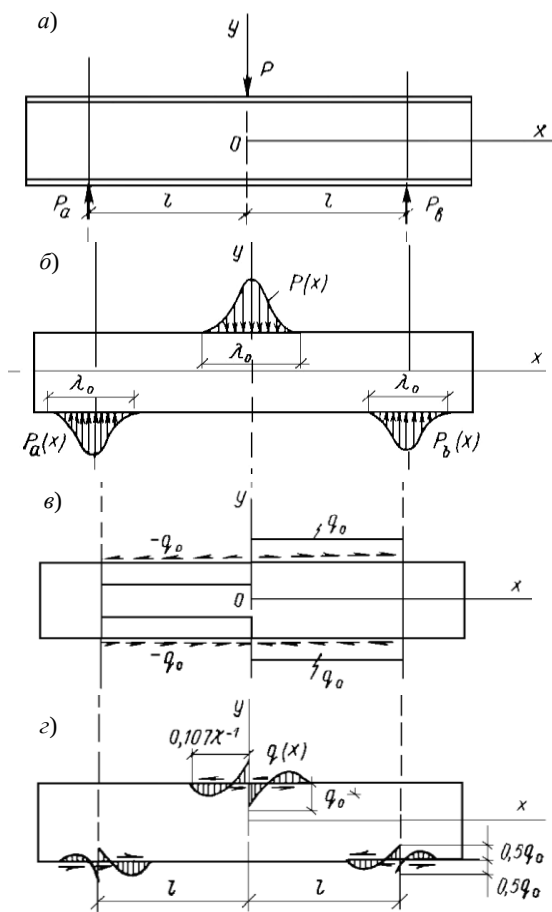


Рис. 7. Схемы загрузки двутаврового стержня

5. Методика расчета напряжений в тонкостенном стержне

Напряженное состояние тонкостенного стержня можно определить двумя путями, различными по методике, но приводящими к одному и тому же результату. Рассмотрим их.

Можно непосредственно использовать формулы:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{N}{F} + \frac{M_z}{J_z} y + \frac{M_y}{J_y} z + \frac{B_\omega}{J_\omega} \omega + \sigma_x^1; \\ \sigma_s &= \sigma_s^1; \\ \tau_{xs} &= \frac{Q_y S_z^{otc}}{J_z \delta} + \frac{Q_z S_y^{otc}}{J_y \delta} + \frac{M_\omega S_\omega^{otc}}{J_\omega \delta} + \tau_{xs}^1,\end{aligned}\quad (26)$$

в которых члены

$$\bar{\sigma}_x = \sigma_x - \sigma'_x \text{ и } \bar{\tau}_{xy} = \tau_{xy} - \tau'_{xy} \quad (27)$$

определяют элементарные напряжения в целом стержне. Тогда в добавки σ'_x , σ'_y и τ'_{xy} должны входить только чисто местные напряжения, обусловленные особенностями граничных условий (условий связности) на краях составляющих стержень полос. В этом случае, например, для стенки стержня, показанного на рисунке 7, задача определения напряжений будет решаться так:

а) элементарные напряжения для всего стержня можно найти из выражений:

$$\left. \begin{aligned}\bar{\sigma}_x^0 &= \frac{M_z}{J_z} y; \\ \bar{\tau}_{xy}^0 &= \frac{Q_y S_z^{omc}}{2J_z t_c},\end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Полные же напряжения в полосе от касательных усилий на кромке, имеющих всплеск по (19), определяются наложением добавочных напряжений (24) на основные напряжения:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \alpha_4(\zeta, \mu, \eta) \frac{g}{2t}; \\ \sigma_y &= \beta_4(\zeta, \mu, \eta) \frac{g}{2t}; \\ \tau_{xy} &= \gamma_4(\zeta, \mu, \eta) \frac{g}{2t}.\end{aligned}\quad (25)$$

На рисунке 7, а приведена общая схема загрузки двутаврового стержня сосредоточенными силами. После удаления поясов распределение усилий взаимодействия по кромкам стенки раскладывается на три схемы (б, в, г), а напряженное состояние, вызванное каждой из этих схем загрузки, описывается соответственно формулами. Входящие в формулы коэффициенты (безразмерные напряжения) можно представить в табличной форме.

Исследование относительного влияния каждой из этих схем показывает, что порядок напряжений от схем (б) и (в) загрузки, в общем, одинаков, т.е. они равноценны по своему влиянию на напряженное состояние стенки. Что же касается схемы (г), то она может оказать некоторое влияние лишь на касательные напряжения в области стенки, находящейся в непосредственной близости от места загрузки балки сосредоточенной силой. На напряжения же σ_x и σ_y всплеск касательных усилий взаимодействия влияет слабо, и при практических расчетах им в большинстве случаев можно пренебречь.

где M_z и Q_y – изгибающие моменты и поперечная сила в стержне; J_z – момент инерции его поперечного сечения; S_z^{omc} – статический момент отсеченной части стержня;

б) местные напряжения от нормального давления $p(x)$, действующего на верхней кромке, определяются формулами (4);

в) местные напряжения от касательных усилий взаимодействия q_0 определяются по формулам (25). Однако следует учесть, что эти формулы дают выражения полных напряжений в полосе (стенке) от загрузки ее кромки касательными усилиями q_0 . Поэтому для получения *местных* напряжений надо использовать следующие формулы:

$$\begin{aligned}\sigma_x^1 &= (\alpha_4 - \alpha_4^0) \frac{g}{2t}; \\ \sigma_y^1 &= \beta_4 \frac{g}{2t}; \\ \tau_{xy}^1 &= (\gamma_4 - \gamma_4^0) \frac{g}{2t}.\end{aligned}\quad (29)$$

Следовательно, из табулированных значений безразмерных напряжений α_4 и γ_4 надо вычесть величины

$$\left. \begin{aligned}\alpha_4^0 &= \frac{1+3\mu}{2}(\eta - \zeta \operatorname{sign} \zeta); \\ \gamma_4^0 &= \frac{3\mu^2 + 2\mu - 1}{4} \operatorname{sign} \zeta.\end{aligned}\right\} \quad (30)$$

Безразмерное напряжение β_4 остается без изменения;

г) то же самое необходимо учесть и при определении напряжений от всплеска касательных усилий взаимодействия на кромках. При этом определяют коэффициенты $\Delta\alpha_4$, $\Delta\beta_4$, $\Delta\gamma_4$ формул (24) как *полные безразмерные напряжения* в полосе от ее загрузки касательными усилиями $\bar{q}(x)$ по (19). Для получения *чисто местных напряжений* от этой загрузки нужно на коэффициент $\Delta\alpha_4$ наложить величину

$$\Delta\alpha_4^0 = \frac{1+3\mu}{2q_0} \int_{\zeta}^{\zeta_0} \bar{q}(\xi) d\xi, \quad (31)$$

представляющую собой безразмерное элементарное напряжение в полосе от загрузки ее усилиями $\bar{q}(x)$.

Такой метод расчета напряжений имеет, по-видимому, внешнее преимущество, состоящее в том, что формулы (26) используются в нетрансформированном виде. Однако в самом процессе счета после разрезки (мысленной) стержня на составляющие его плоские полосы приходится то вновь возвращаться к рассмотрению целого стержня (вычисление элементарных напряжений), то оперировать отдельными полосами (вычислениями по пунктам б, в, г). Поэтому указанное преимущество выглядит весьма формальным; в то же время расчет методически усложнен. Представляется предпочтительным другой путь: после разрезки стержня на полосы последние рассматриваются самостоятельно, изолированно от всего стержня. В соответствии с введенной гипотезой о нулевой жесткости полос на изгиб их из своих плоскостей в смысле неучета нормальных усилий взаимодействия $\bar{p}(x)$ первого рода все внешние нагрузки как бы передаются на те полосы стержня, параллельно которым они действуют. Поэтому элементарные напряжения от них определяются *не в стержне, а в полосе*.

Таким образом, в примере по рисунку 7 элементарные напряжения в стенке будут следующими:

$$\left. \begin{aligned}\sigma_x^0 &= \frac{M_z}{J_z^c} y = \frac{4M_z}{3t_c h_c^3} y; \\ \tau_{xy}^0 &= \frac{Q_y S_z^{omc}}{2J_z^c t_c} = \frac{2}{3} \cdot \frac{Q_y}{t_c h_c} (h_c^2 - y^2).\end{aligned}\right\} \quad (32)$$

Эти напряжения не совпадают с выражениями (28). Однако при учете напряжений от касательных усилий взаимодействия q_0 теперь следует использовать уже не формулы (29), а формулы (25), в коэффициенты которых входят и элементарные безразмерные напряжения по (30).

Нетрудно показать, что

$$\bar{\sigma}_x^0 = \sigma_x^0 + \alpha_4^0 \frac{q_0}{2t_c};$$

$$\bar{\tau}_{xy}^0 = \tau_{xy}^0 + \gamma_4^0 \frac{q_0}{2t_c}.$$

Коэффициенты же $\alpha_4 - \alpha_4^0$, β_4 , $\gamma_4 - \gamma_4^0$ определяют собой чисто местные напряжения от загрузки кромок полосы касательными усилиями q_0 .

Аналогичные рассуждения можно провести и в отношении учета всплеска $\bar{q}(x)$ касательных усилий взаимодействия.

Таким образом, вторая методика расчета напряжений будет складываться из следующих операций:

- а) вычисление элементарных напряжений в полосе по (32);
- б) определение местных напряжений от загрузки кромок нормальными давлениями $p(x)$ по формулам (4);
- в) нахождение напряжений от касательных усилий q_0 взаимодействия по формулам (25);
- г) определение напряжений от всплеска $\bar{q}(x)$ касательных усилий;
- д) суммирование всех этих напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев, В.Н. Расчет тонкостенных металлических стержней / В.Н. Киселев, Ю.В. Попков, В.А. Фетисов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 12. – С. 57 – 63.
2. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни / В.З. Власов. – М.: Стройиздат, 1940. – 278 с.
3. Папкович, П.Ф. Теория упругости / П.Ф. Пакович. – М.-Л., 1939. – 376 с.
4. Броуде, Б.М. Распределение сосредоточенного давления в стальных балках / Б.М. Броуде. – М.-Л., 1950. – 583 с.
5. Малышкина, И.Н. Исследование напряженного состояния подкрановых балок / И.Н. Малышкина // Промышленное строительство. – 1966. – № 10.
6. Горев, В.В. Металлические конструкции: в 3 т. / В.В. Горев. – М.: Высш. шк., 1999. – Т. 2. – 528 с.
7. Металлические конструкции: справ. проектировщика: в 3 т. / под ред. В.В. Кузнецова. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – Т. 2. – 576 с.
8. Нормы проектирования. Стальные конструкции: СНиП II-23-81*. – М.: Госстрой СССР, 1982. – 96 с.
9. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1993-1-1: 2010 / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 93 с.

Поступила 11.05.2012

STRESS STATE OF THIN-WALLED ROD

V. KISELEV

In the article the method of calculating thin-walled prismatic rod of open profile bending. Rod divided into a finite number of elementary bands and analyzed the work of each band on the real normal and tangential forces, attached to the edges of the bands. Results of research is needed to build a rigorous solution to the consideration of local stresses in the bars.

УДК 624.012.45

ЖЕСТКОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ, УСИЛЕННЫХ АРМАТУРОЙ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

Е.Н. БАДАЛОВА*(Полоцкий государственный университет)*

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований жесткости и трещиностойкости железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных в растянутой зоне арматурой из углеродных волокон, приклеенной к наружной поверхности бетона. Показано, что при усилении железобетонных конструкций приклеиванием такой дополнительной арматуры, кроме обеспечения прочности, важным является соблюдение требований жесткости и трещиностойкости усиленных конструкций. Наличие в сечении усиленного элемента контактного соединения накладывает ограничения на возможность полного использования прочностных свойств арматуры из углеродных волокон, что также должно быть учтено и при расчетах по эксплуатационной пригодности. Научно обоснован подход к подбору дополнительной арматуры исходя из требований по эксплуатационной пригодности, учитывающий совместную работу дополнительной арматуры с бетоном, который позволяет обеспечить надлежащее функционирование и долговечность усиленной конструкции в течение всего проектного срока службы при соразмерных расходах. Выявленные в процессе экспериментальных исследований особенности работы усиленных конструкций учтены при разработке методики расчета прогиба и ширины раскрытия трещин.

Введение. Исследованию жесткости и трещиностойкости железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, посвящены работы М. Daugevičius [1], А.А. Шилина [2], Р. Holzenkampfer [3], F. Rostásy [4] и др. В результате экспериментальных исследований, проведенных на железобетонных балках, усиленных под нагрузкой приклеиванием в растянутой зоне пластин из углеродных волокон [1], установлено, что прирост прогиба уменьшается для усиленных конструкций по сравнению с неусиленными и зависит от дополнительной анкеровки пластин из углеродных волокон. В [2] отмечено, что усиление изгибаемых железобетонных конструкций композиционными материалами не позволяет значительно уменьшить прогиб и увеличить момент трещинообразования усиленной конструкции в силу малой жесткости (небольшой толщины) композиционного материала. Однако в несколько раз увеличивается прогиб усиленной конструкции до наступления ее разрушения. Расчет усиленной конструкции по жесткости и трещиностойкости предлагается осуществлять по действующим российским нормам с учетом наличия в сечении композиционного материала. Ширина раскрытия трещин согласно [2] определяется разностью удлинений арматуры и композиционного материала на участке между трещинами.

По результатам обработки экспериментальных данных Р. Holzenkampfer предложил эмпирическую формулу для расчета ширины раскрытия трещин [3], учитывая влияние дополнительной арматуры суммарным коэффициентом армирования. В Fib Bulletin 14 прогиб усиленных конструкций предложено определять по формулам Eurocode 2, вводя в расчет геометрические характеристики сечения с учетом композиционной арматуры [5]. Ширина раскрытия трещин определяется по формуле Eurocode 2, при этом средний шаг трещин вычисляют с учетом влияния основной и дополнительной арматуры по формуле, предложенной Rostásy и другими учеными в 1996 году.

Экспериментальные исследования. С целью получения данных о фактических значениях прогибов и ширины раскрытия трещин, а также выявления особенностей трещинообразования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматурой из углеродных волокон, были проведены экспериментальные исследования.

В качестве опытных образцов использовались многопустотные плиты длиной 5980 мм, шириной 720 мм, высотой 220 мм [6]. Плиты армированы предварительно напряженными стержнями 2Ø12 S800. Плита П-1 не имела усиления; другие плиты были усилены в растянутой зоне приклеиванием двух пластин из углеродных волокон на длине 5500 мм без заведения за грани опор шириной 50 мм, толщиной 1,4 мм (плита П-2: $f_{tk,ad} = 1715$ МПа; $E_{s,ad} = 280000$ МПа) и шириной 50 мм, толщиной 1,2 мм (плиты П-3, П-4, П-5: $f_{tk,ad} = 2465$ МПа; $E_{s,ad} = 191000$ МПа).

В результате экспериментальных исследований установлено, что для усиленных плит значение изгибающего момента, при котором прогиб конструкции достигает предельной величины (29,6 мм), увеличивается в 1,29 – 1,51 раза по сравнению с неусиленной плитой. Наблюдалось также уменьшение прогиба плиты при применении дополнительной анкеровки пластин из углеродных волокон (плита П-5), что проиллюстрировано рисунком 1.

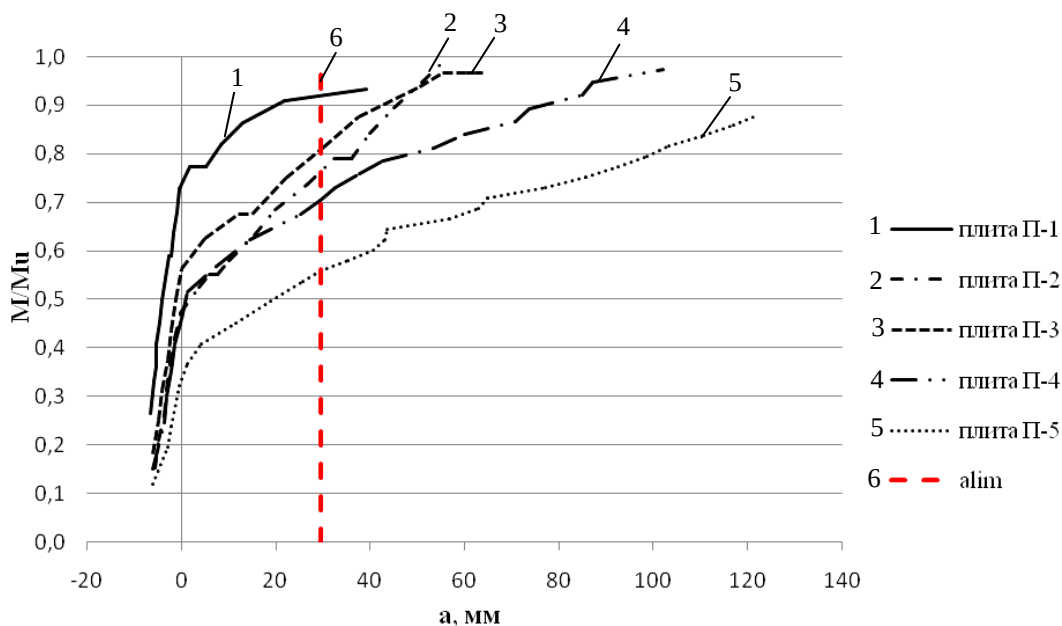


Рис. 1. Изменение прогиба плиты с уровнем нагружения

Увеличение момента трещинообразования M_{cr} для усиленных плит по сравнению с неусиленной составило 13 – 24 % (табл. 1); в 1,27 – 1,53 раза возросло значение изгибающего момента, при котором ширина раскрытия трещин, измеренная на уровне центра тяжести предварительно напряженной арматуры плиты, достигла предельного значения, составляющего 0,2 мм (рис. 2).

Таблица 1

Сопоставление значений изгибающего момента M_u , $M_{[alim]}$, $M_{[wlim]}$ для плит П-1 – П-5

Шифр опытных плит	M_{ui} , кН·м	$\frac{M_{ui}}{M_{u1}}$	M_{cr} , кН·м	$M_{[wlim]}$, кН·м	$M_{[alim]}$, кН·м
П-1	40,2	1,00	31,0	31,0	37,0
П-2	69,4	1,73	36,5	47,5	53,2
П-3	58,4	1,45	36,5	39,4	55,9
П-4	67,7	1,68	34,9	42,2	47,7
П-5	85,6	2,13	38,5	46,0	47,9

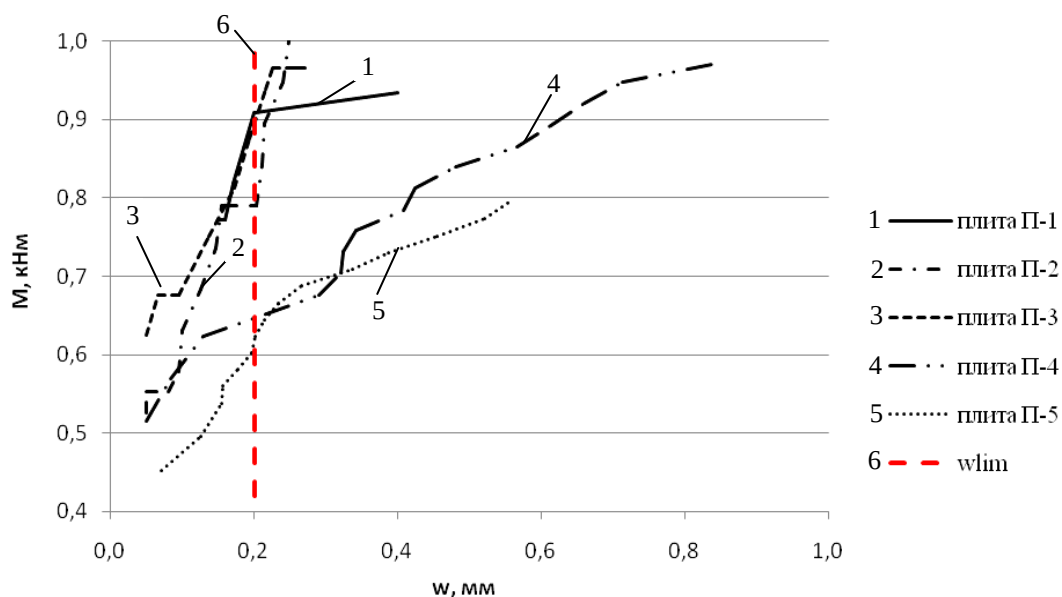


Рис. 2. Изменение ширины раскрытия трещин с уровнем нагружения

Таким образом, экспериментально подтверждено влияние усиления предварительно напряженных многпустотных плит приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматуры из углеродных волокон на повышение жесткости и трещиностойкости конструкции.

При исследовании трещинообразования наблюдали следующую картину распределения трещин: средний шаг трещин был близок по значению для неусиленной и усиленных плит и составлял на разных уровнях нагружения для плиты П-1 130 – 183 мм и для плит П-2 – П-5 110 – 170 мм. Однако для усиленных плит зона образования трещин, нормальных к продольной оси, по длине конструкции была больше по сравнению с неусиленной плитой. Отношение длины участка с трещинами для усиленных и неусиленной плит изменялось в процессе нагружения и в предельном состоянии составило 1,58 – 1,84.

Как известно, основной причиной потери работоспособности усиленных конструкций является разрушение контактного соединения арматуры из углеродных волокон с бетоном. Это накладывает ограничения на возможность полного использования прочностных свойств арматуры из углеродных волокон, что учитывается расчетом на прочность сечения усиленного элемента [7]. Подобные ограничения имеют место, когда учитывается работа дополнительной арматуры из углеродных волокон в сечении усиленного элемента в расчетах по эксплуатационной пригодности. Для повышения эффективности использования данного способа усиления дополнительную арматуру из углеродных волокон следует выполнять с предварительным напряжением.

Расчет прогиба и ширины раскрытия трещин. При расчете прогиба усиленной изгибаемой конструкции учитывается ее напряженно-деформированное состояние до усиления. Прогиб железобетонной многпустотной плиты, усиленной приклеиванием арматуры из углеродных волокон, от действия внешней нагрузки можно определить в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [8]:

$$a = k_r \cdot \int_0^1 \overline{M}(x) \cdot \frac{1}{r(x)} \cdot dx, \quad (1)$$

где $\overline{M}(x)$ – изгибающий момент в сечении с координатой x по длине пролета от действия единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения; $\frac{1}{r(x)}$ – кривизна усиленного элемента в сечении x , определяемая по формуле:

$$\frac{1}{r(x)} = \frac{1}{r_0(x)} + \frac{1}{r_1(x)} + \frac{1}{r_{ad}(x)}. \quad (2)$$

Здесь $\frac{1}{r_0(x)}$ – кривизна элемента в сечении x от действия усилия предварительного напряжения; $\frac{1}{r_1(x)}$ – кривизна элемента в сечении x от внешней нагрузки, действующей до усиления; $\frac{1}{r_{ad}(x)}$ – кривизна усиленного элемента в сечении x от внешней нагрузки, действующей после усиления.

Кривизну усиленного элемента принимают равной разности относительных деформаций крайнего сжатого волокна бетона и крайнего растянутого стержня арматуры (предварительно напряженной арматуры плиты), деленной на расстояние от крайнего сжатого волокна бетона до крайнего растянутого стержня арматуры. Краевые относительные деформации усиленного сечения определяют с учетом наличия дополнительной арматуры из углеродных волокон из расчета системы уравнений деформационной модели.

Особенность работы дополнительной арматуры в сечении, проявляющаяся в увеличении длины участка с трещинами для конструкций, усиленных приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, предлагается учитывать коэффициентом k_r . Коэффициент k_r определяли по результатам обработки экспериментальных данных и принимали равным отношению длины участка с трещинами для неусиленной плиты к длине участка с трещинами для усиленной плиты на соответствующем уровне нагружения.

Сравнение экспериментальных значений прогибов железобетонных многпустотных плит с теоретическими значениями прогибов (2) при изгибающем моменте от эксплуатационной нагрузки отражено в таблице 2.

Ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси изгибаемого элемента, усиленного дополнительной арматурой из углеродных волокон, предлагается определять согласно [8] по формуле:

$$w = k_r \cdot s_r \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (3)$$

где s_r – расстояние между трещинами (в расчетах, приведенных в данной статье, s_r принималось равным опытным значениям); ε_{sm} – средние относительные деформации стержневой арматуры, определенные с

учетом работы дополнительной арматуры из углеродных волокон и работы бетона на растяжение; ε_{cm} – средняя относительная деформация бетона между трещинами.

Таблица 2

Сопоставление экспериментальных и теоретических значений прогиба a для плит П-1 – П-5

Шифр опытных плит	$M_{экспл.}$ кН·м	a_{exp} , мм	a_{calc} , мм	$\frac{a_{exp}}{a_{calc}}$
П-1	32,9	8,4	11,4	0,74
П-2	51,1	26,8	32,6	0,82
П-3	43,8	22,0	25,9	0,85
П-4	49,5	32,5	34,7	0,94
П-5	60,7	65,0	67,2	0,97

Значение $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ определяется по следующей формуле [8]:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (4)$$

где σ_s – напряжение в растянутой стержневой арматуре в сечении с трещиной, определенное с учетом работы дополнительной арматуры из углеродных волокон; $\rho_{p,eff}$ – коэффициент армирования эффективной площади растянутого бетона, определяемый по формуле:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_{s,ad} \cdot \frac{E_{s,ad}}{E_s} + \xi_1^2 \cdot A'_p}{A_{c,eff}}. \quad (5)$$

Здесь $A_{s,ad}$, A'_p – площадь поперечного сечения соответственно дополнительной арматуры из углеродных волокон и предварительно напряженной стержневой арматуры; $E_{s,ad}$, E_s – модули упругости соответственно дополнительной арматуры из углеродных волокон и предварительно напряженной стержневой арматуры; ξ_1 – поправочный коэффициент прочности сцепления, равный

$$\xi_1 = \sqrt{\xi \cdot \frac{\varnothing_{s,ad}}{\varnothing_p}}, \quad (6)$$

где $\varnothing_{s,ad}$ – эквивалентный диаметр дополнительной арматуры, соответствующий площади контакта арматуры из углеродных волокон с бетоном конструкции. Для условий эксперимента $\varnothing_{s,ad} = \frac{b_{s,ad}}{\pi}$;

$\varnothing_p$ – диаметр предварительно напряженной арматуры.

Сопоставление экспериментальных данных средней ширины раскрытия трещин, полученных при испытании железобетонных многоспустотных плит, со значениями, определенными по формуле (3) при изгибающем моменте от эксплуатационной нагрузки, приведено в таблице 3.

Таблица 3

Сопоставление экспериментальных
и теоретических значений ширины раскрытия трещин w для плит П-1 – П-5

Шифр опытных плит	$M_{экспл.}$ кН·м	w_{exp} , мм	w_{calc} , мм	$\frac{w_{exp}}{w_{calc}}$
П-1	32,9	0,25	0,27	0,93
П-2	51,1	0,15	0,18	0,83
П-3	43,8	0,14	0,19	0,74
П-4	49,5	0,33	0,34	0,97
П-5	60,7	0,34	0,35	0,97

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили влияние усиления растянутой зоны железобетонных многпустотных плит перекрытия дополнительной арматурой из углеродных волокон на повышение жесткости и трещиностойкости конструкции. С целью повышения эффективности использования данного способа усиления дополнительную арматуру следует выполнять с предварительным напряжением. Выявлена особенность работы дополнительной арматуры из углеродных волокон в сечении конструкции. Длина участка с трещинами, нормальными к продольной оси, для усиленных плит была больше по сравнению с длиной участка с трещинами для неусиленной плиты при соответствующем уровне нагружения. Отношение длины участка с трещинами для усиленных и неусиленной плит изменялось в процессе нагружения и в предельном состоянии составило 1,58 – 1,84.

Предложенная методика расчета прогиба и ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси сечения изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, позволит учитывать работу дополнительной арматуры в сечении элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mykolas Daugevičius. Жесткость железобетонных балок, усиленных углепластиком при действии кратковременной и длительной нагрузки / Mykolas Daugevičius // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III междунар. симпоз., Минск, 9 – 11 нояб. 2011 г.: в 2 т.; М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь. Науч.-исслед. респ. унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС»; редкол.: М.Ф. Марковский [и др.]. – Минск: Минсктиппроект, 2011. – Т. 1: Бетонные и железобетонные конструкции. – С. 9 – 19.
2. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин [и др.]. – М.: ОАО «Изд-во “Стройиздат”», 2007. – 184 с.
3. Holzenkampfer P. Ingenieurmodelle des verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile / P. Holzenkampfer. – TU Braunschweig, Germany, 1996.
4. Neubauer, U.N. Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates / U.N. Neubauer and F.S. Rostasy // Concrete and Composites, Proc. 7th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, ECS Pub. Edinburgh, Scotland. – 1997. – V. 2. – P. 109 – 118.
5. Federation International du Beton // Bul. 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. – Lausanne, 2001.
6. Бадалова, Е.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием углепластиковых пластин / Е.Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 45 – 50.
7. Бадалова, Е.Н. Прочность по нормальному сечению железобетонных многпустотных плит перекрытий, усиленных арматурой из углеродных волокон / Е.Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2011. – № 16. – С. 60 – 66.
8. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций: ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250) / М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 191 с.

Поступила 21.05.2012

THE STIFFNESS AND CRACK RESISTANCE OF THE REINFORCED CONCRETE HOLLOW-CORE SLABS, THAT WERE STRENGTHENED WITH THE CFRP ADDITIONAL ARMATURE

E. BADALOVA

In the questions of reinforced concrete structures additional CFRP armature strengthening, other than to ensure the strength capacity, the compliance with the stiffness and crack resistance requirements for the strengthened elements is important too. The presence of the contact joint in the cross-section of the strengthened element, which destruction is a major cause of the structure efficiency loss, imposes restrictions on the strength capacity of the CFRP armature usage possibility, which should also be taken into account in the operational integrity analysis. The evidence-based approach to the reinforcement rate analysis, which is based on the operational integrity analysis, which takes into account the joint work of the additional armature with the concrete, allows the ensuring of the proper functioning and longevity of the strengthened structure throughout the design lifetime with fair debits. In this article the results of the experimental and theoretical researches of the stiffness and crack resistance of the reinforced concrete hollow-core slabs, that were strengthened in the tensile zone with the help of additional CFRP armature are listed. The features of the strengthened elements, which were identified during the experiments, were taken into account when the deflection and crack opening width calculations were developed.

УДК 624.012.35

ОЦЕНКА РАСЧЕТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО МЕТОДИКАМ РАЗЛИЧНЫХ НОРМ

канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ,
канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ, В.И. ЛЫМОРЕВА
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается этап проектирования и реконструкции молочно-товарных ферм после проведения обследований данных объектов с целью определения технического состояния зданий и дальнейшей их модернизации. Для определения необходимости усиления конструкций с учетом их фактического состояния требуется выполнение проверочных расчетов. В данной работе проведен сравнительный анализ расчета эксплуатируемых железобетонных конструкций по СНиП 2.03.01-84, СНБ 5.03.01-02, ТКП EN 1991-1-1-2009, выявлены основные различия при определении расчетных значений сопротивлений арматуры и бетона, изменения в области коэффициентов надежности (безопасности) по нагрузкам, а также различия при определении нормативных значений снеговых нагрузок. По представленным методикам выполнен расчет с определением коэффициентов запаса конструкций по прочности.

Введение. В последнее время уделяется большое внимание реконструкции и модернизации сельскохозяйственных зданий. В декабре 2011 года Правительством Беларуси была поставлена задача реконструкции в каждом хозяйстве республики одной молочно-товарной фермы с учетом современных прогрессивных технологий.

В Витебской области реконструкции подлежат 228 молочно-товарных ферм, при этом все работы планируется завершить к сентябрю 2012 года. Для составления проекта реконструкции данных объектов специалистами Полоцкого государственного университета был проведен ряд обследований с целью определения фактического технического состояния зданий.

Обследованные фермы построены в 80 – 90-х годах, несущие элементы запроектированы по СНиП 2.03.01-84 [1]. Проверочные расчеты железобетонных конструкций независимо от времени их проектирования и возведения следует производить согласно СНБ 5.03.01-02 [2], а также ТКП EN 1991-1-1-2009 [3]. Пригодность к дальнейшей эксплуатации оценивается выполнением всех требований норм расчета по предельным состояниям первой и второй групп. Конструкции, которые по результатам расчетов не удовлетворяют требованиям норм, подлежат усилению либо замене.

Целью данной работы являлось проведение сравнительного анализа расчета несущей способности железобетонных конструкций по СНиП 2.03.01-84 (далее – СНиП), СНБ 5.03.01-02 (далее – СНБ), ТКП EN 1991-1-1-2009 (далее – ТКП).

Расчет железобетонных конструкций по предельным состояниям первой группы

В основе расчета изгибаемых железобетонных элементов по предельным состояниям первой группы как по СНБ, так и по СНиП, и ТКП лежит метод предельных состояний.

Расчет железобетонных конструкций по прочности производится исходя из общего условия метода предельных состояний:

$$S_d \leq R_d, \quad (1)$$

где S_d – внутреннее усилие в сечении конструкции, которое вызвано расчетным воздействием; R_d – предельное усилие, которое способна воспринять конструкция в сечении, нормальном к продольной оси, и определяемое при линейно-упругом расчете сечений по формуле:

$$R_d = R \left(\frac{\alpha f_{ck}}{\gamma_c}, \frac{\alpha f_{yk}}{\gamma_s}, \frac{\alpha f_{pk}}{\gamma_s}, \dots a_d \right), \quad (2)$$

где f_{ck} , f_{yk} , f_{pk} – нормативное сопротивление бетона, арматуры, предварительно напряженной арматуры соответственно; γ_c , γ_s – частные коэффициенты безопасности по бетону и арматуре соответственно; a_d – геометрические параметры поперечного сечения.

Расчет по СНиП предполагает использование того же условия при отличающихся буквенных обозначениях.

Сравнение коэффициентов безопасности (надежности) по материалу

Отметим различия при переходе от нормативных значений сопротивлений бетона и арматуры к расчетным согласно ранее действующему СНиП, а также ныне действующим нормам СНБ и ТКП.

Согласно СНиП расчетные сопротивления бетона осевому сжатию R_b определяются путем деления нормативных сопротивлений на коэффициент надежности по бетону при сжатии γ_{bc} , принимаемый для основных видов бетона равным 1,3.

Для перехода от нормативного сопротивления бетона осевому сжатию к его расчетному значению по СНБ и ТКП используют частный коэффициент безопасности по бетону γ_c , который при расчете по предельным состояниям первой группы принимается равным 1,5.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}. \quad (3)$$

Обозначим различия при вычислении расчетного значения сопротивления растяжению арматуры.

Для перехода к расчетным сопротивлениям арматуры растяжению R_s согласно СНиП используют зависимость:

$$R_s = \frac{R_{sn}}{\gamma_s}, \quad (4)$$

где γ_s – коэффициент надежности по арматуре, определяемый по таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты надежности и безопасности по арматуре

Арматура		СНиП	СНБ и ТКП
СНиП	СНБ, ТКП	коэффициент надежности по арматуре γ_s	коэффициент безопасности по арматуре γ_s
A-I, A-II	S240, S300	1,05	1,1
A-III Ø, мм: 6 – 8, 10 – 40	S400	1,1 1,07	1,1
	S500 Ø, мм: 6 – 22, 4 – 5, 25 – 40		1,15 1,2

Расчетное сопротивление арматуры f_{yd} согласно СНБ и ТКП определяют путем деления нормативного сопротивления f_{yk} ($f_{0,2k}$) на частный коэффициент безопасности по арматуре γ_s , определяемый из таблицы 1.

Сравнение расчетных сопротивлений арматуры растяжению согласно СНиП, СНБ и ТКП представлено в таблице 2.

Таблица 2

Расчетные сопротивления арматуры растяжению

Стержневая арматура классов		Расчетные сопротивления растяжению арматуры для предельных состояний первой группы, МПа	
СНиП	СНБ, ТКП	R_s	f_{yd}
A-I	S240	225	218
A-II	S300*	280	272*
A-III Ø, мм: 6 – 8 10 – 40	S400	355 365	364
	S500 Ø, мм: 4 – 5 6 – 22 25 – 40		417 435 417
*В настоящее время на территории Беларуси арматура класса S300 не сертифицирована.			

Анализируя вопрос перехода от нормативных к расчетным сопротивлениям материалов можно отметить, что расчетные сопротивления арматуры изменились не существенно. Изменения в расчетном сопротивлении бетона при проверке прочности изгибаемых элементов сказываются незначительно (разница несущей способности не превышает 2 %).

Сравнение коэффициентов безопасности (надежности) по нагрузкам

Основными характеристиками постоянных и переменных нагрузок являются их нормативные значения. Нормативные значения нагрузок и воздействий следует принимать согласно СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [4]. Расчетные значения нагрузок определяют путем умножения их нормативного значения на частный коэффициент безопасности (надежности).

При расчетах по СНиП значения коэффициентов надежности по нагрузке γ_f принимали согласно СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия». Значения данных коэффициентов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов надежности по нагрузке

Конструкции сооружений	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f
Металлические	1,05
Бетонные со средней плотностью свыше 1600 кг/м ³ , железобетонные, каменные, армокаменные, деревянные	1,1
Бетонные со средней плотностью 1600 кг/м ³ и менее, изоляционные, выравнивающие и отделочные слои (плиты, материалы в рулонах, засыпки, стяжки и т.п.), выполняемые:	
- в заводских условиях	1,2
- на строительной площадке	1,3

Значения частных коэффициентов безопасности для нагрузок при расчете по СНБ и ТКП приведены в таблице 4.

Таблица 4

Значения частных коэффициентов безопасности для нагрузок

Эффект от воздействия	Частный коэффициент безопасности при нагрузках	
	постоянных G_k, γ_G	переменных Q_k, γ_Q
Неблагоприятный	1,35	1,50

Отдельным вопросом стоит рассмотреть различия в определении нормативных значений снеговой нагрузки при расчете по СНиП, СНБ и ТКП.

Нормативные значения снеговой нагрузки для расчета по СНИП определялись согласно приложению к СНИП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» по картам районирования территории СССР.

Согласно карте районирования по весу снегового покрова (рис. 1) территория Беларуси разделена на 3 района: I, II, III. Значения нормативной снеговой нагрузки составляли: для I района – 50 кг/м^2 ; для II – 70 кг/м^2 , для III – 100 кг/м^2 .



Рис. 1. Карта районирования по весу снегового покрова территории Беларуси
согласно приложению к СНиП 2.01.07-85

Нормативное значение снеговой нагрузки для расчета по СНБ определяется согласно Изменению № 1 к СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» (рис. 2), согласно которому территория Беларуси делится на 2 района: I Б и II Б.



Рис. 2. Карта районирования по весу снегового покрова территории Беларуси согласно Изменению № 1 к СНиП 2.01.07-85

Нормативные значения снеговой нагрузки для района I Б составляют 80 кг/м^2 , для II Б – 120 кг/м^2 .

Для определения нормативного (характеристического) значения снеговой нагрузки по ТКП EN 1991-1-3-2009 [5] используется карта районирования (рис. 3).

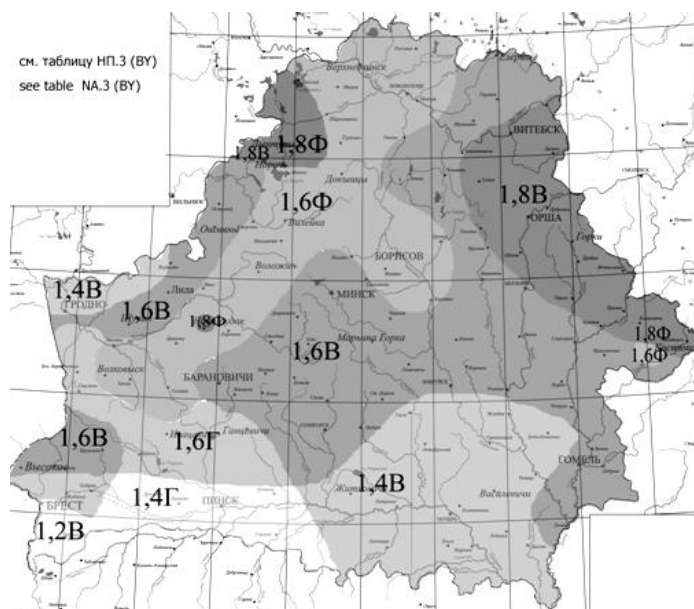


Рис. 3. Карта районирования по весу снегового покрова территории Беларуси для расчета по ТКП EN 1991-1-3-2009

Территория Беларуси разделена на районы, для которых рассчитаны значения снеговой нагрузки по математическим зависимостям. Численные значения, представленные на карте, соответствуют интенсивности нагрузки, выраженной в килоньютонах на метр квадратный.

Основные сочетания нагрузок при расчете конструкций

Расчет конструкций следует производить по наиболее неблагоприятному сочетанию нагрузок. Эти сочетания устанавливаются из анализа вариантов одновременного действия различных нагрузок.

В соответствии с ТКП и СНБ при расчете конструкций по предельным состояниям первой группы следует принимать следующие сочетания нагрузок:

- первое основное сочетание

$$\sum_j (\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}) + \sum_{i=1} (\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}); \quad (5)$$

- второе основное сочетание

$$\sum_j (\xi \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}) + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}), \quad (6)$$

где $\gamma_{G,j}$ – частный коэффициент безопасности для постоянных нагрузок; $\gamma_{Q,i}$ – то же для переменных нагрузок; $G_{k,j}$ – нормативные значения постоянных нагрузок; $Q_{k,i}$ – нормативные значения сопутствующих переменных нагрузок; $\psi_{0,i}$, $\psi_{1,1}$, $\psi_{2,i}$ – коэффициенты сочетаний переменных нагрузок, принимаемые в зависимости от типа ответственности зданий и сооружений; ξ – коэффициент уменьшения для неблагоприятно действующей постоянной нагрузки (принимается равным 0,85); $Q_{k,1}$ – нормативное значение доминирующей переменной нагрузки.

В соответствии с рекомендациями к СНИП при условии действия не более одной временной нагрузки расчет может производиться с коэффициентом сочетания, равным 1.

Поверочные расчеты несущих конструкций покрытия по различным нормативным документам

Приведем расчет по представленным методикам, выполненный для ребристой плиты покрытия размером 1,5 × 6 м, высотой 300 мм, изготовленной из бетона класса С25/30. Продольная рабочая арматура класса S400 2Ø18. Предварительно были собраны сведения о нагрузках на плиту покрытия, представленные в таблице 5.

Таблица 5

Сбор нагрузок на плиту покрытия

Состав кровли	Нормативное значение нагрузки (кН/м ²)			Коэффициент надежности по нагрузке			Расчетное значение нагрузки (кН/м ²)		
				СНиП	СНБ	ТКП	СНиП	СНБ	ТКП
Постоянная нагрузка									
Гидроизоляционный ковер δ = 9 мм, ρ = 1800 кг/м ³	0,162			1,3	1,35	1,35	0,211	0,219	0,219
Асфальтобетонная стяжка, δ = 40мм, ρ = 1760 кг/м ³	0,704						0,915	0,950	0,950
Утеплитель (газосиликат) δ =150 мм, ρ = 540 кг/м ³	0,81						1,053	1,094	1,094
Обмазочная пароизоляция, δ = 9 мм, ρ = 1700 кг/м ³	0,153						0,199	0,207	0,207
Собственный вес ребристой плиты покрытия	2,06			1,1			2,266	2,781	2,781
Итого постоянная	—			—			4,644	5,251	5,251
Временная									
Снеговая	1	1,2	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,8	2,4
Полная	—						6,044	7,051	7,651

Полная расчетная равномерно распределенная нагрузка на 1 метр погонный железобетонной ребристой плиты шириной 1,5 м максимальным пролетом 6 м составит:

- по СНИП: $q_p = 6,044 \cdot 1,5 = 9,066$ кН/м;
- по СНБ: $q_p = (5,251 + 0,7 \cdot 1,8) \cdot 1,5 = 9,766$ кН/м;
- по ТКП: $q_p = (5,251 + 0,7 \cdot 2,4) \cdot 1,5 = 10,396$ кН/м.

Расчетный изгибающий момент в плите покрытия максимальным пролетом 6 м равен:

- по СНИП $M = (q \cdot l^2) / 8 = 40,8$ кН·м;
- по СНБ $M = 43,94$ кН·м;
- по ТКП $M = 46,78$ кН·м.

Полученные коэффициенты запаса прочности приведены в таблице 6.

Таблица 6

Коэффициенты запаса прочности

Наименование конструкций	Максимальные усилия в конструкциях от действующих нагрузок M_{sd} , кН·м			Предельное усилие, которое способна воспринять конструкция M_{rd} , кН·м			Коэффициенты запаса прочности		
	СНиП	СНБ	ТКП	СНиП	СНБ	ТКП	СНиП	СНБ	ТКП
Рёбристые железобетонные плиты покрытия	40,8	43,94	46,78	49,95	49,84	49,84	1,22	1,13	1,06

На основании проведенного сравнительного анализа расчета несущей способности конструкции по СНиП 2.03.01-84, СНБ 5.03.01-02 (с изменениями), ТКП EN 1991-1-1-2009 можно сделать следующие **выводы**:

1) прочностные характеристики элемента, рассчитанные по различным нормам, изменяются существенно;

2) расчетные усилия, возникающие от действующих нагрузок, рассчитанных по различным нормам, имеют значительную разницу, что связано с повышением коэффициентов надежности (безопасности) по нагрузкам, а также изменением нормативных значений снеговых нагрузок.

Анализ, выполненный в рамках исследований, позволяет рекомендовать использование вероятностного метода расчета для более точной оценки прочности элемента при наличии достаточного количества статистических данных по результатам обследования. Высокая точность позволяет использовать данный метод тогда, когда другие методы показывают, что прочность не обеспечена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01-84* / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.
2. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Изд-во стандартов, 2003.
3. Проектирование железобетонных конструкций: ТКП EN 1992-1-1-2009 / НПП РУП «Стройтехнорм». – Минск, 2009.
4. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
5. Воздействия на конструкции: ТКП EN 1991-1-3-2009 / НПП РУП «Стройтехнорм». – Минск, 2009. – Ч. 1 – 3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки.

Поступила 23.05.2012

ASSESSMENT OF SETTLEMENT OF STRENGTH CONCRETE STRUCTURES OPERATED BY THE METHOD OF DIFFERENT STANDARDS

A. KOLTUNOV, A. BAKATOVICH, V. LYMOREVA

After numerous surveys during the company of modernizing of the milk - commodity farm, a planning phase of the reconstruction of the objects came. It's required to perform verification calculations to determine the need to strengthen the structures according to their actual state. Buildings, engineered by the requirements of the previous TNPA, should be checked with the current regulations. The comparative analysis of calculations of the reinforced concrete structures were held according to SNiP 2.03.01-84, SNB 5.03.01-02, TKP EN 1991-1-3-2009 in the present work. The major differences in the determination of the values of resistivity of concrete and rebar, as well as, changes in safety factors of stress were revealed. Also, differences in the determination of the normative values of snow loads were identified. Also, there were identified differences in the determination of the normative values of snow loads. The calculations were held according to presented methods with determination of safety factors for structural strength.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 691:539.217.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗВИЛИСТОСТИ КАПИЛЛЯРОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА

*д-р техн. наук, проф. В.И. НИКИТИН**(Государственная высшая школа в Бялой Подляске, Польша);**В.А. КОФАНОВ**(Брестский государственный технический университет)*

Рассмотрен одномерный поток влаги сквозь тело с извилистыми капиллярами. На основе теории обобщенной проводимости и капиллярной теории получена формула для определения коэффициента извилистости. Выполнен сравнительный анализ предлагаемой формулы с другими формулами, включающими эмпирические коэффициенты, и экспериментальными данными, полученными для зернистых сред и каменных материалов. Предложено учитывать извилистость капилляров при определении коэффициента переноса влаги в капиллярно-пористых строительных материалах.

Введение. Процессы взаимного тепло- и массопереноса в пористых средах лежат в основе различных промышленных технологий. Осознается важность учета этих процессов и в строительстве, прежде всего при проектировании ограждающих конструкций зданий из капиллярно-пористых материалов, поры которых содержат влагу и имеют сложную геометрию, которая трудно поддается теоретическому количественному описанию. В поровом пространстве влажных материалов ограждающих конструкций имеют место процессы нестационарного, обычно одномерного, переноса парообразной и жидкой влаги, описываемые моделями различной сложности. Эти модели описывают указанные процессы с точностью до коэффициентов переноса (коэффициенты влагопереноса, паропроницаемости и т.д.), которые зависят от различных факторов, характеризующих рассматриваемый материал с точки зрения влагопереноса, а также физических свойств переносимой влаги. Среди этих факторов аналитически наиболее трудно с достаточной точностью учесть влияние параметров, характеризующих пористую структуру материала, поэтому коэффициенты переноса влаги обычно определяются экспериментальным путем.

Попытки построения формул для определения коэффициентов переноса влаги на основе упрощенных представлений о пористой структуре материала, чаще всего в виде параллельных прямых капилляров, приводят к необходимости определения еще одной геометрической характеристики пористого материала, учитывающей извилистость его капилляров. Если при одномерном влагопереносе сквозь пористое тело толщиной L известна средняя длина траектории частицы влаги l , то извилистость капилляров оценивается коэффициентом ξ , равным отношению

$$\xi = \frac{l}{L}. \quad (1)$$

Дискуссии относительно извилистости пористой среды ξ и формулы ее определения и экспериментальные данные для различных пористых сред приведены в обширной литературе, например в [1 – 4]. Формулы, предлагаемые для определения кривизны ξ , содержат эмпирические коэффициенты, которые вносят неопределенности при расчетах. Эти модели применимы для узкого круга материалов и в узком диапазоне пористостей. Поэтому возникает необходимость изучить этот вопрос и, опираясь на универсальные научные подходы, разработать более совершенные модели.

В данной работе рассмотрен одномерный поток влаги сквозь тело с извилистыми капиллярами и на основе теории обобщенной проводимости и капиллярной теории получена формула для определения коэффициента извилистости. При выборе указанного метода решения поставленной задачи мы опирались на мнения многих исследователей, в частности авторов работ [1 – 3], о том, что метод обобщенной проводимости, имеющий более чем столетнюю историю, является наиболее надежным и универсальным инструментом для создания моделей переноса тепла и массы в различных пористых средах.

Основные предпосылки и модель для определения коэффициента извилистости капилляров. Рассмотрим одномерный поток жидкой влаги сквозь пористое тело под действием капиллярного давления, создаваемого силами поверхностного натяжения, направленными по касательной к искривленной свободной поверхности жидкости (мениск) в капиллярах (капиллярный перенос влаги). Процесс капиллярного переноса влаги может протекать, к примеру, в поверхностном слое ограждающей конструкции

при косом дожде, поверхностной конденсации влаги, капиллярной конденсации жидкости в мелких порах и др. При этом в слое капиллярного переноса влаги влагосодержание материала w (кг/м³) может меняться от значения сорбционного влагосодержания w_c , при котором в порах материала образуется бесконечный кластер перемещающейся жидкой влаги, до значения w_k , характеризующего момент завершения капиллярного всасывания жидкости при постоянном ее контакте с поверхностью пористого материала.

Для определения коэффициента извилистости капилляров, участвующих в капиллярном переносе влаги, можно воспользоваться формулой Козени, цитируемой по работе [4]:

$$k_f = \frac{\Pi_f^3}{2 \cdot \xi_f \cdot S_{vf}^2}, \quad (2)$$

где k_f – коэффициент проницаемости пористой среды при фильтрационном движении жидкости, м²; Π_f – открытая пористость, м³/м³; ξ_f – безразмерный коэффициент, характеризующий извилистость открытых пор и капилляров; S_{vf} – удельная поверхность (площадь поверхности открытых пор и капилляров в единице объема материала), м²/м³.

В рассматриваемом нами случае приведенные в формуле (2) величины следует относить только к пористости Φ , участвующей в капиллярном переносе влаги:

$$\Phi = \frac{w}{\rho}, \quad (3)$$

где w – влагосодержание материала, кг/м³; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Отметим, что значение пористости, найденное по формуле (3) при влагосодержании капиллярного влагонасыщения w_k и называемое обычно активной пористостью Φ_a , имеет важное значение при расчетах процесса капиллярного влагопереноса. Методика определения значения Φ_a рассмотрена во многих работах, в частности в [5; 6].

Если принять, что вдоль потока жидкости пористость материала Φ представлена цилиндрическими капиллярами, средний радиус этих капилляров можно определить по формуле:

$$r_0 = \frac{2 \cdot \Phi}{S_v}, \quad (4)$$

где r_0 – средний радиус капилляров, м; S_v – удельная поверхность пор и капилляров, участвующих в переносе жидкости, м²/м³.

С учетом сказанного получим соотношение для определения коэффициента проницаемости пористого материала при капиллярном переносе влаги:

$$k = \frac{r_0^2}{8} \cdot \frac{\Phi}{\xi}, \quad (5)$$

где k – коэффициент проницаемости пористой среды; ξ – средний коэффициент извилистости капилляров, участвующих в переносе влаги.

При выводе упомянутых формул для расчета коэффициентов проницаемости (проводимости) реальная хаотическая структура материала с взаимопроникающими компонентами, которая считается однородной и изотропной, заменяется адекватной ей моделью с упорядоченной структурой, состоящей из одинаковых элементарных ячеек.

На рисунке 1 изображена восьмая часть элементарной ячейки простейшей модели структуры с взаимопроникающими компонентами, из которой следует, что объем первой компоненты равен

$$V_1 = 3 \cdot \Delta^2 \cdot L - \Delta + \Delta^3 = 3 \cdot \Delta^2 \cdot L - 2 \cdot \Delta^2. \quad (6)$$

После деления этого выражения на объем $V = L^3$ получим объемную концентрацию первой компоненты

$$m_1 = 3 \cdot c^2 - 2 \cdot c^3, \quad (7)$$

где $c = \Delta/L$.

С помощью рассмотренной модели авторами работ [2; 3] были получены три зависимости для определения коэффициента проницаемости структуры с взаимопроникающими компонентами.

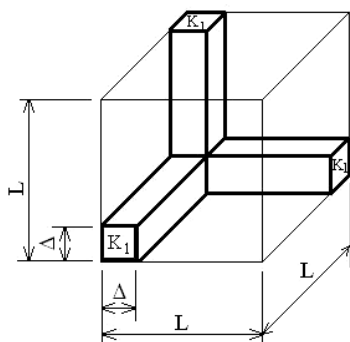


Рис. 1. Восьмая часть элементарной ячейки модели структуры с взаимопроникающими компонентами

Для дальнейшего анализа нами была выбрана следующая зависимость:

$$\frac{k}{k_1} = c^2 + \frac{k_2}{k_1} \cdot 1 - c^2 + 2 \cdot \frac{k_2}{k_1} \cdot c \cdot 1 - c \cdot \left(\frac{k_2}{k_1} \cdot c + 1 - c \right)^{-1}, \quad (8)$$

где k_1 и k_2 – коэффициент проницаемости первой и второй компоненты.

Наш выбор этой зависимости основан на утверждении авторов работы [3] о том, что ее широкое применение оправдано хорошим совпадением результатов расчета по формуле (8) с данными многочисленных экспериментов.

Поскольку при капиллярном переносе влаги можно принять, что проницаемость второй компоненты $k_2 = 0$, а проницаемость первой компоненты равна k_1 , то формула (8) примет вид:

$$k = k_1 \cdot c^2, \quad (9)$$

Для расчета параметра $c = \Delta/L$ будем использовать положительный корень уравнения (7), а именно:

$$c = 0,5 + \sin \left[\frac{\arcsin \frac{2 \cdot m_1 - 1}{3}}{3} \right], \quad m_1 = \Phi. \quad (10)$$

После определения параметра c неизвестной величиной в формуле (9) остается проницаемость первой компоненты k_1 (поры, заполненные подвижной жидкостью), которую определим из следующих соображений.

Примем, что в пределах элементарной ячейки жидкость перемещается в условном цилиндрическом капилляре длиной L . Выразим радиус этого капилляра через геометрические параметры элементарной ячейки. Для этого разделим объем первой компоненты, определяемой по формуле (6), на размер L и получим среднее значение площади поперечного сечения капилляра

$$\Delta^2 \cdot 3 - 2 \cdot c = \pi \cdot r_0^2. \quad (11)$$

Откуда средний радиус искомого капилляра равен

$$r_0 = \Delta \cdot \sqrt{\frac{3 - 2 \cdot c}{\pi}}. \quad (12)$$

Если известно значение радиуса, найденного, например, по формуле (4), то можно определить значения геометрических параметров модели структуры с взаимопроникающими компонентами. Именно этот радиус будем подразумевать при последующих рассуждениях.

Известно [6; 7], что явление всасывания жидкости цилиндрическим капилляром из гидрофильного материала описывается на основе уравнения Юнга и Лапласа, а также закона Пуазейля исходя из того, что силы капиллярного всасывания уравновешиваются силами трения, тяжести и инерции. Малость скорости всасывания жидкости позволяет пренебречь силами инерции. В горизонтальном капилляре силы тяжести не оказывают влияния на процесс всасывания жидкости, и поэтому скорость перемещения мениска определяется по формуле:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{r_0 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{4 \cdot \eta \cdot x}, \quad (13)$$

где x – путь, пройденный мениском при капиллярном всасывании жидкости, м; τ – время, за которое пройден путь x , с; r_0 – радиус капилляра, м; σ – поверхностное натяжение на границе жидкость – воздух, Н/м; θ – угол смачивания, град; η – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

При малых значениях τ , x и r_0 в вертикальном или наклонном капилляре масса впитанной жидкости и, следовательно, сила ее тяжести малы, поэтому скорость капиллярного всасывания жидкости без большой погрешности также может быть определена по формуле (13).

В соответствии с законом Дарси скорость движения жидкости в капилляре радиуса r_0 пропорциональна градиенту давления и равна

$$\frac{dx}{d\tau} = -\frac{k_1}{\eta} \cdot \frac{dP}{dx}, \quad (14)$$

где k_1 – коэффициент проницаемости, м².

Градиент давления в капилляре выразим через капиллярное давление:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{P_k}{x}, \quad (15)$$

где P_k – капиллярное давление, которое по уравнению Лапласа равно

$$P_k = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r_0}. \quad (16)$$

После подстановки уравнений (15) и (16) в формулу (14) и приравнивания правой части полученного выражения к правой части формулы (13) определяем коэффициент проницаемости одиночного капилляра радиуса r_0 :

$$k_1 = \frac{r_0^2}{8} = \frac{1}{8 \cdot \pi} \cdot \pi \cdot r^2, \quad (17)$$

который прямо пропорционален площади поперечного сечения этого капилляра.

Перепишем уравнение (9) с учетом формулы (17) и получим зависимость для расчета коэффициента проницаемости пористого материала с взаимопроникающими компонентами:

$$k = \frac{r_0^2}{8} \cdot c^2. \quad (18)$$

После приравнивания правых частей уравнений (5) и (18) и учета зависимости (10) формула для оценки коэффициента извилистости пор и капилляров, участвующих в переносе жидкости, записывается в виде

$$\xi = \frac{\Phi}{c^2} = \Phi \cdot \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[\frac{\arcsin \frac{2 \cdot \Phi - 1}{3}}{3} \right] \right\}^{-2}. \quad (19)$$

К такому же уравнению можно прийти при использовании соотношения проницаемостей пористых сред, приведенного в работе [8]. Для потока влаги сквозь пористую среду имеем соотношение:

$$\frac{\text{проницаемость среды при } \Phi < 1}{\text{проницаемость среды при } \Phi = 1} = \frac{\Phi}{\xi}, \quad (20)$$

где Φ – часть открытой пористости P , которая участвует в переносе жидкой или парообразной влаги ($0 \leq P \leq 1$).

При капиллярном переносе влаги согласно формуле (9) проницаемость среды k при $\Phi = 1$ составляет $k = k_1$. Если $\Phi < 1$, то $k = k_1 \cdot c^2$. Тогда формула (20) приобретает вид:

$$\frac{k_1 \cdot c^2}{k_1} = \frac{\Phi}{\xi}. \quad (21)$$

В результате, как и в уравнении (19), коэффициент извилистости $\xi = \Phi / c^2$.

Из соотношения (20) следует, что поток пара сквозь пористое тело с влагосодержанием $w < w_c$ проходит через поры, характеризуемые коэффициентом извилистости

$$\xi = \frac{\delta_0}{\delta_p} \cdot \Phi, \quad (22)$$

где δ_p и δ_0 – коэффициенты паропроницаемости пористой среды и воздуха, кг/(м·с·Па); $\Phi = P - \frac{w}{\rho}$ при $w \leq w_c$.

Поскольку δ_0 известно (например, при температуре 293 К $\delta_0 = 1,9 \cdot 10^{-10}$ кг/(м·с·Па)), то с помощью эксперимента можно определить δ_p , а затем по формуле (22) вычислить извилистость ξ . Однако, как свидетельствуют опытные данные, приведенные в работе [9], и теоретический анализ работы [10], может оказаться, что в некоторых случаях (мелкопористые материалы) $\delta_0 < \delta_p$ и $\xi < 1$. Это объясняется тем, что наряду с диффузией пара имеет место перенос влаги в жидкой фазе. На такие особенности измерения коэффициента паропроницаемости δ_p стандартными методами обращается внимание и в Европейской норме [11]. Поэтому и в границах сорбционного увлажнения материала при определении ξ нужно исходить из того, что $\delta_0 = k_1$, а $\delta_p = k_1 \cdot c^2$, и пользоваться формулой (19).

Сравнительный анализ полученной зависимости. Сравним полученную формулу (19) с некоторыми формулами, предлагаемыми для определения коэффициента извилистости капилляров. Так,

в работе [3] коэффициент извилистости пор (без каких либо пояснений) предлагается определять следующим образом:

$$\xi = \left(\frac{1 - \Phi_c}{\Phi - \Phi_c} \right)^{0.4} \quad \text{при } \hat{O} \geq 0,2, \quad (23)$$

$$\xi = \text{const} = 3 \quad \text{при } \hat{O}_n < \hat{O} < 0,2.$$

Наибольшую неопределенность при расчетах по этой формуле вносит значение пористости Φ_c , которая принимается равной 0,15. Считается [3], что при $\Phi_c \leq 0,15$ жидкость (проводящая компонента) не образует в поровом пространстве бесконечного кластера и перенос жидкой влаги отсутствует. Отметим, что для ряда стеновых материалов даже в состоянии капиллярного водонасыщения объем пор $\Phi = \Phi_a$, заполненных водой, не превышает 0,15. Возможно, при построении формулы (23) учитывались пористые среды, имеющие активную пористость $\Phi_a > 0,15$.

Рассмотрим еще одну формулу для определения коэффициента извилистости, которая получена по результатам наблюдений за перемещаемым под давлением потоком жидкости в зернистых средах и приведена в работе [12]:

$$\xi = 1 + P \cdot \ln \left(\frac{1}{\Phi} \right), \quad (24)$$

где P – коэффициент, аппроксимирующий экспериментальные данные (например, для среды из сферических частиц $P = 0,41$, в случае кубических частиц $P = 0,63$); Φ – пористость.

Основным недостатком формулы (24) является то, что она применима для узкого круга пористых сред и расширение этого круга требует все новых и новых экспериментов. Тем не менее отмечается [12], что формула (24) заслуживает применения при исследовании процессов переноса влаги.

Сравнение представленных здесь формул для определения коэффициента извилистости капилляров ξ между собой, а также с экспериментальными данными, заимствованными из работы [8], показаны на рисунке 2. Приведенные на этом рисунке данные были получены с помощью измерения электрической проводимости образцов, поровое пространство которых насыщалось солевым раствором. В качестве пористых сред рассматривались зернистые среды, состоящие из моно- и полидисперсных стеклянных частиц размером от 1 до 8 мм, стеклянного порошка и кварцевого песка с частичками 120 – 210 мкм, а также образцы песчаника и известняка, имеющие довольно однородную пористую структуру.

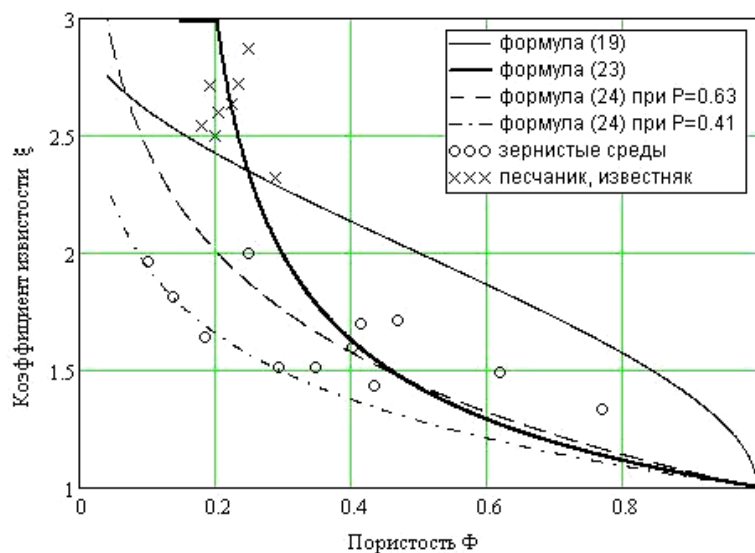


Рис. 2. Зависимость коэффициента извилистости капилляров от пористости Φ , участвующей в капиллярном или фильтрационном переносе жидкой влаги, и экспериментальные данные: о – при фильтрационном потоке; × – при капиллярном переносе влаги

Из рисунка 2 следует, что при одинаковой пористости из диапазона $0,18 \leq \Phi \leq 0,29$ коэффициент извилистости капилляров каменных материалов значительно превышает таковой для зернистых сред. Очевидно, что такое соотношение сохраняется и при других значениях пористости. Как и ожидалось, формула (24) удовлетворительно предсказывает опытные данные для зернистых сред из сферических ($P = 0,41$) и кубических ($P = 0,63$) частичек. Формулы (19) и (23) неплохо предсказывают опытные данные для каменных мате-

риалов, имеющих довольно узкий диапазон пористости $0,18 \leq \Phi \leq 0,29$. Можно предположить, что в данном диапазоне пористости подобные результаты будут наблюдаться и для других строительных материалов, имеющих однородную пористую структуру. Однако формула (23) будет недопредсказывать опытные данные при высокой пористости $\Phi > 0,3$, а ее применение при малых значениях пористости $\Phi \leq 0,15$ просто не предусмотрено. Представляется, что в таком случае из трех рассмотренных формул предлагаемая формула (19) является наиболее предпочтительной для расчета коэффициента извилистости капилляров строительных материалов, пористую структуру которых приближенно можно считать изотропной и однородной. Однако не все изделия строительных материалов могут удовлетворять этому условию. В некоторых случаях готовые изделия имеют слоистую текстуру, которая приводит к анизотропии свойств. При этом коэффициент извилистости капилляров в направлении, перпендикулярном слоям, будет значительно больше, чем вдоль слоев. Это обстоятельство нужно учитывать при использовании формулы (19) соответствующими поправками.

Заключение. Предложена зависимость для определения коэффициента извилистости капилляров строительных материалов однородной и изотропной пористой структуры в направлении потока влаги, полученная с помощью теории обобщенной проводимости и капиллярной теории. Выполнен сравнительный анализ предлагаемой теоретически обоснованной формулы с другими формулами, включающими эмпирические коэффициенты, и экспериментальными данными. Анализ показал, что предлагаемая зависимость является наиболее предпочтительной при определении указанной геометрической характеристики, применяемой при расчетах процессов переноса влаги в капиллярно-пористых материалах строительных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л.Л. Васильев, С.А. Танаева. – Минск: Наука и техника, 1971. – 266 с.
2. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справ. кн. / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
3. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 247 с.
4. Лыков, А.В. Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
5. Никитин, В.И. Влияние температуры обжига на параметры пористой структуры керамики / В.И. Никитин, Б. Бацкель-Бжозовска // Вестн. БрГТУ. – 2005. – № 2: Стр-во и архитектура. – С. 98 – 103.
6. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels / M. Janz. – Lund: Division of Building Materials, 1997. – 76 p. – (Report TVBM-3076).
7. Никитин, В.И. Прогнозирование морозостойкости стеновой керамики на основе показателей капиллярного впитывания воды / В.И. Никитин, Б. Бацкель-Бжозовска // Вестн. БрГТУ. – 2008. – № 1: Стр-во и архитектура. – С. 132 – 135.
8. Carman, P.C. Flow of gases through porous media / P.C. Carman. – London: Butterworths, 1956. – 179 p.
9. Epstein, N. On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // Chem. Eng. Sci. – 1989. – Vol. 44(3). – P. 777 – 779.
10. Афонин, А.В. Вычисление паропроницаемости капиллярно-пористых материалов с учетом течения сорбционных пленок и конденсата / А.В. Афонин, В.И. Никитин // Вестн. БрГТУ. – 2003. – № 1: Стр-во и архитектура. – С. 34 – 40.
11. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków i materiałów budowlanych. Wielkości fizyczne dotyczące przenoszenia masy. Słownik: PN-EN ISO 9346:2009. – Data zatwierdzenia 22.04.09.
12. Jianchao, C. A discussion of the effect of tortuosity on the capillary imbibition in porous media / C. Jianchao, Y. Boming // Transp. Porous Media. – 2011. – № 89(2). – P. 251 – 263.

Поступила 31.05.2012

DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF TORTUOSITY CAPILLARIES BUILDING MATERIALS IN THE CALCULATION OF MOISTURE TRANSFER

V. NIKITIN, V. KOFANOV

A one-dimensional moisture flow through the body with sinuous capillaries was considered and on the basis of the theory of generalized conductivity and capillary theory the formula for determining the coefficient of tortuosity was obtained. The comparative analysis of the proposed formulas with other formulas, including empirical coefficients was performed and experimental data were obtained for the granular media and stone materials. It is proposed to take into account the tortuosity of the capillaries in determination of the coefficient of moisture transfer in capillary-porous building materials.

УДК 666.973.2

ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АРБОЛИТА С НАПРАВЛЕННОЙ УКЛАДКОЙ ЗАПОЛНИТЕЛЯ

А.Н. ЯГУБКИН, канд. техн. наук, доц. **В.В. БОЗЫЛЕВ**
(Полоцкий государственный университет)

Представлена технология получения модифицированного арболита с направленной укладкой заполнителя. Для её реализации получена добавка-модификатор арболитовой смеси Арбел, которая позволяет снизить влияние вредных веществ, находящихся в древесном заполнителе и при этом получить изделия с более низкой эксплуатационной влажностью, не подверженные сульфатной коррозии. Разработан метод колебательного уплотнения арболитовой смеси, обеспечивающий направленную укладку древесного заполнителя в арболите, снижающий дефекты структуры и повышающий прочность до 70 % по сравнению с традиционным арболитом. С помощью теории механики разрушения композиционных материалов выполнено обоснование механизма повышения прочностных показателей арболита с направленной укладкой заполнителя. Для традиционного арболита использовалась такая феноменологическая модель, как композит с заполнителем в виде коротких волокон с беспорядочной ориентацией; для арболита с направленной укладкой заполнителя – композит с заполнителем в виде однонаправленных волокон (горизонтальная и вертикальная ориентация древесного заполнителя).

Введение. Изделия из древесно-цементных композиций считаются эффективными строительными материалами, их производство получило распространение во многих странах мира (Австрия, Великобритания, Германия, США, Япония и др.). В условиях рыночной экономики стеновые материалы должны отвечать новым современным требованиям по созданию благоприятного микроклимата в жилых помещениях, стремясь к признанному эталону – стенам, изготовленным из натурального дерева. В настоящее время строящиеся в Республике Беларусь здания имеют существенные недостатки. Так, в домах, возводимых из железобетонных панелей, из-за недостаточной влажности в помещениях у жителей обостряются астматические заболевания. В домах со стенами из ячеистых газосиликатных блоков наблюдается плесень, грибок на стенах, что приводит к аллергическим заболеваниям. Кроме того, материалы должны быть экологичными, иметь низкую себестоимость, а для этого необходимо использовать местное сырьё.

Выполнить комплекс поставленных требований может новый вид арболита – модифицированный арболит с направленной укладкой заполнителя, разработанный в Полоцком государственном университете [1 – 4]. Направленная укладка заполнителя обеспечит достижение высоких прочностных и теплоизоляционных показателей, а добавка Арбел позволит снизить эксплуатационную влажность и при этом избежать сульфатной коррозии. Целью исследований являлось обоснование механизма повышения прочностных показателей арболита с направленной укладкой заполнителя.

Основная часть. Арболит представляет собой материал, состоящий из цементного камня и древесного заполнителя. При этом свойства арболита значительно отличаются от свойств составляющих его материалов. Таким образом, арболит – это композиционный материал [5]. В строении композита обычно выделяют дисперсную фазу (в арболите – древесный заполнитель) и матрицу (в арболите – цементный камень).

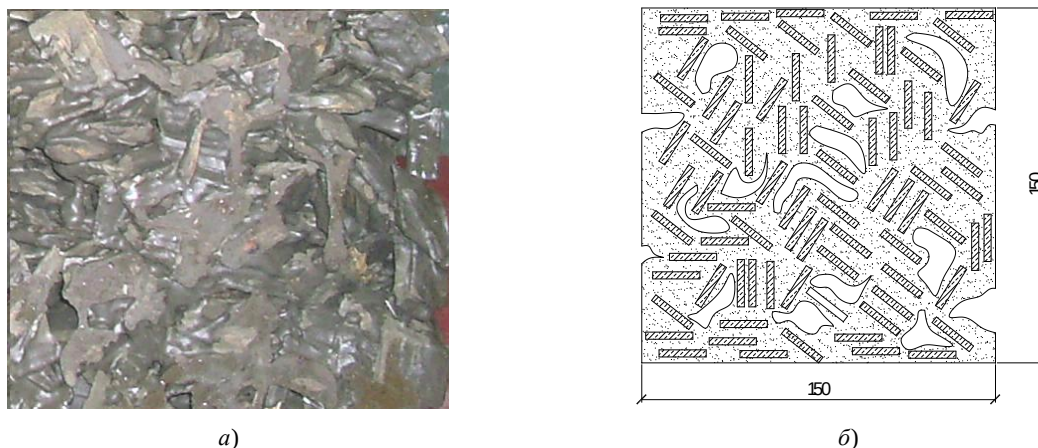
На первом этапе с помощью традиционных методов уплотнения арболитовой смеси и разработанного в Полоцком государственном университете метода колебательного уплотнения были изготовлены и испытаны арболитовые образцы (таблица).

Сравнение способов уплотнения бетонной смеси для изготовления арболита

Способ уплотнения	Плотность арболита, кг/м ³	Прочность арболита, МПа
Виброуплотнение	552	2,50
Виброуплотнение с пригрузом	549	2,55
Колебательное уплотнение (горизонтальное расположение щепы)	550	3,28
Колебательное уплотнение (вертикальное расположение щепы)	551	4,11

Как видно из таблицы 1, при неизменной плотности (550 кг/м³) прочность при использовании традиционных методов до 70 % ниже, чем при использовании технологии колебательного уплотнения; при вертикальном расположении щепы прочность на 20 % выше, чем при горизонтальном. Эффект повышения прочностных показателей арболита с направленной укладкой заполнителя можно объяснить, используя положения механики композиционных материалов.

В работе [5] приведена феноменологическая модель – композит с заполнителем в виде коротких волокон с беспорядочной ориентацией (рис. 1).



а)

б)

Рис. 1. Композит с наполнителем в виде коротких волокон:

а – фотоснимок; б – модель

Как видно из рисунка 1, матрица не является непрерывной средой, поэтому построение полностью адекватной модели невозможно [5 – 11].

В монографии [5] предложена формула для расчёта разрушающей нагрузки такого композита:

$$P = \varepsilon \cdot (E_{fcp} \cdot A_f + E_m \cdot A_m), \quad (1)$$

где ε – относительная деформация композита; E_{fcp} – средний модуль упругости наполнителя, МПа; A_f – площадь поперечного сечения наполнителя, мм²; E_m – модуль упругости матрицы, МПа; A_m – площадь поперечного сечения матрицы, мм².

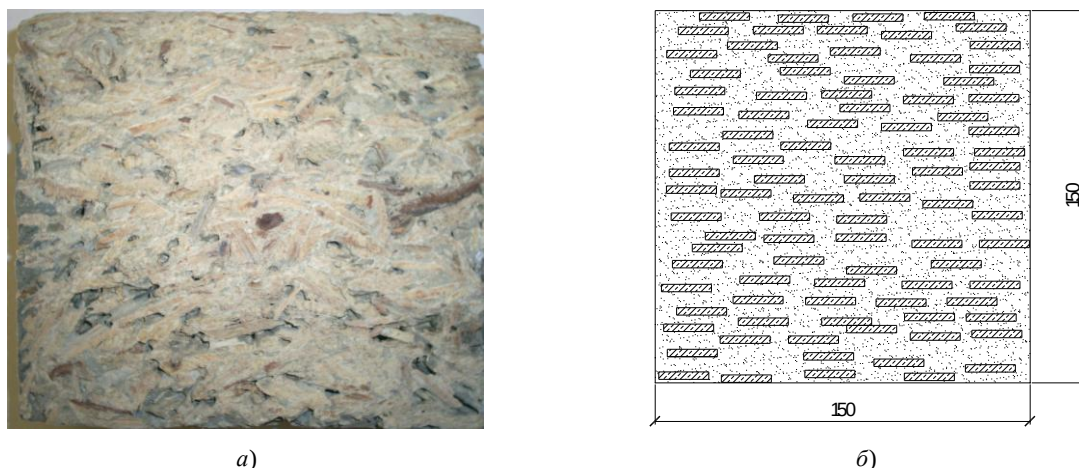
Для традиционного арболита данная формула позволяет рассчитать величину разрушающей нагрузки при следующих значениях показателей: $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$ [12]; $E_{fcp} = 5,2 \cdot 10^3$ МПа (среднее значение между модулем упругости древесины вдоль и поперёк волокон); $A_f = 0,81 \cdot 10^4$ мм² (содержание древесины в арболите 36 %); $E_m = 19 \cdot 10^3$ МПа [12]; $A_m = 0,675 \cdot 10^4$ мм² (содержание цементного камня в арболите 30 %).

$$P = 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot (5,2 \cdot 10^3 \cdot 0,81 \cdot 10^4 + 19 \cdot 10^3 \cdot 0,675 \cdot 10^4) = 5,11 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Разделив полученную разрушающую нагрузку на площадь поперечного сечения образца, получим показатель прочности арболита:

$$R = \frac{P}{A} = \frac{5,11 \cdot 10^4}{2,25 \cdot 10^4} = 2,27 \text{ МПа.}$$

Использование направленной укладки древесного наполнителя приводит к упорядоченному распределению в матрице частиц наполнителя. Феноменологическая модель арболита с направленной укладкой наполнителя (горизонтальная ориентация щепы) представлена на рисунке 2.



а)

б)

Рис. 2. Композит с наполнителем в виде однонаправленных волокон:

а – фотоснимок; б – модель

В этом случае механизм разрушения при сжатии в соответствии с положениями механики композиционных материалов можно объяснить с позиции развития цилиндрических микротрещин на границе между наполнителем и матрицей. Источниками таких микротрещин являются разрушения частиц наполнителя, дефекты контактного слоя, а также места слабой адгезии технологического или эксплуатационного происхождения (начальные микротрещины).

В монографии [13] предложена формула для определения прочности на сжатие композита, разрушающегося по данному механизму:

$$R = 2u_f E_f \sqrt{\frac{\gamma_{fm} \cdot (1 + u_m) \cdot (1 - 2 \cdot u_m + u_f^{-1})}{r_0 E_m \cdot (u_m + u_f) \cdot (u_f^{-1} - 1)}}, \quad (2)$$

где u_f – коэффициент Пуассона наполнителя ($u_f = 0,02$ [6] – коэффициент Пуассона древесины поперёк волокон); E_f – модуль упругости наполнителя, МПа ($E_f = 400$ МПа [12] – модуль упругости древесины поперёк волокон); γ_{fm} – работа деформации в контактном слое, Н/мм (значение $\gamma_{fm} = 891$ Н/мм принято из монографии [14] как работа по продавливанию бруска через цементный кубик); u_m – коэффициент Пуассона матрицы ($u_m = 0,2$ [12] – коэффициент Пуассона цементного камня); r_0 – радиус наполнителя, мм ($r_0 = 6$ мм); E_m – модуль упругости матрицы, МПа ($E_m = 19 \cdot 10^3$ МПа [12] – модуль упругости цементного камня).

Подставив значения, приведённые выше для арболита с горизонтальной ориентацией наполнителя (нагрузка действует поперёк волокон) в формулу (2), получим показатель прочности арболита:

$$R = 2 \cdot 0,02 \cdot 400 \cdot \sqrt{\frac{891 \cdot (1 + 0,2) \cdot (1 - 2 \cdot 0,2 + 0,02^{-1})}{6 \cdot 19000 \cdot (0,2 + 0,02) \cdot (0,02^{-1} - 1)}} = 3,36, \text{ МПа.}$$

Рассмотренная феноменологическая модель позволяет оценить прочностные показатели арболита при использовании образцов с вертикальным расположением частиц наполнителя (рис. 3).



Рис. 3. Композит с наполнителем в виде однонаправленных волокон
а – фотоснимок; б – модель

Данная модель будет отличаться от предыдущей тем, что нагрузка будет действовать вдоль волокон древесного наполнителя, и, соответственно, изменятся его характеристики (модуль упругости и коэффициент Пуассона).

Для наполнителя с вертикальной ориентацией изменятся значения следующих показателей: $u_f = 0,5$ [12] – коэффициент Пуассона древесины вдоль волокон; $E_f = 10000$ МПа [12] – модуль упругости древесины вдоль волокон; значение $\gamma_{fm} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ Н/мм принято из монографии [15] как работа по выдвиганию бруска из цементного кубика.

Подставив данные значения в формулу (2), получим показатель прочности арболита:

$$R = 2 \cdot 0,5 \cdot 10000 \cdot \sqrt{\frac{4,5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,2) \cdot (1 - 2 \cdot 0,2 + 0,5^{-1})}{6 \cdot 19000 \cdot (0,2 + 0,5) \cdot (0,5^{-1} - 1)}} = 4,19, \text{ МПа.}$$

На основании полученных по феноменологическим моделям значений прочностей можно сделать вывод о том, что прочность арболита с направленной укладкой наполнителя при вертикальной ориентации до 80 % выше, чем прочность традиционного арболита. При этом прочность арболита с вертикальной ориентацией наполнителя на 20 % выше, чем прочность арболита с горизонтальной ориентацией.

Полученные экспериментальные данные при использовании конкретной щепы известного гранулометрического состава полностью согласуются с полученными теоретическими значениями. При этом обеспечен прирост прочности арболита с направленной укладкой заполнителя на 70 % в сравнении с традиционной технологией изготовления арболитовых образцов.

Заключение. Положения теории механики разрушения композиционных материалов позволили обосновать механизм увеличения прочностных показателей арболита с направленной укладкой заполнителя, изготовленного по технологии колебательного уплотнения, по сравнению с традиционным арболитом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ягубкин, А.Н. Оптимизация процесса уплотнения бетонной смеси при изготовлении арболита / А.Н. Ягубкин, В.В. Бозылев, Ю.П. Голубев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2009. – № 12. – С. 61 – 68.
2. Ягубкин, А.Н. К вопросу подбора состава и дозировки добавок-модификаторов арболита / А.Н. Ягубкин, В.В. Бозылев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2010. – № 6. – С. 84 – 89.
3. Ягубкин, А.Н. Влияние направления укладки заполнителя на прочностные и теплоизоляционные свойства арболита / А.Н. Ягубкин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2011. – № 8. – С. 77 – 81.
4. Ягубкин, А.Н. Технология получения стеновых блоков из арболита с направленной укладкой заполнителя / А.Н. Ягубкин, В.В. Бозылев // Строительная наука и техника. – 2011. – № 6. – С. 66 – 69.
5. Фудзии, Т. Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзии, М. Дзако. – М.: Мир, 1982. – 232 с.
6. Вильдеман, В.Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В.Э. Вильдеман, Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов; под ред. Ю.В. Соколкина. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 288 с.
7. Победря, Б.Е. Механика композиционных материалов / Б.Е. Победря. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
8. Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. / под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
9. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
10. Расчёт многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
11. Немировский, Ю.В. Прочность элементов конструкций из композиционных материалов / Ю.В. Немировский, Б.С. Резников. – Новосибирск: Наука, 1986. – 166 с.
12. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции / И.Х. Наназашвили. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, 1990. – 415 с.
13. Черепанов, Г.П. Механика разрушения композиционных материалов / М.: Наука. Физматлит, 1983. – 296 с.
14. Использование древесных отходов для производства арболита / В.И. Бухаркин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1973. – 432 с.
15. Цементный фибролит / Б.Н. Кауфман [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Кауфмана. – М.: ГСИ, 1961. – 159 с.

Поступила 25.05.2012

BACKGROUND OF THE MECHANISM OF INCREASING STRENGTH INDICES ARBOLIT WITH THE DIRECTION IN FILLER

A. YAGUBKIN, V. BOZYLEV

In Polotsk State University developed a technology for producing the modified arbolit directional stacking aggregate. To implement the technology developed by addition of a modifier mixture arbolit Arbel, which reduces the effect of harmful substances in the wood filler and still get the product at a lower operating humidity is not exposed to sulphate corrosion have developed a method of vibrational compaction arbolit mixture, which provides the direction in wood placeholder in the Arbolit, reduces defects and improves the durability of the structure up to 70 % compared to the traditional arbolit. Using the theory of fracture mechanics of composite materials is justified mechanism to increase the strength of directional indicators arbolit packing filler. We used the following phenomenological model: for the traditional arbolit – a composite with a filler in the form of short fibers with random orientation, for directional laying arbolit filler – filler composite with unidirectional fibers in the form of (horizontal and vertical orientation of the wood filler).

УДК 666.965

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ПРОЧНОСТИ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА, ПОЛУЧАЕМОГО ИЗ ОТХОДОВ ЛИТЕЙНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ, канд. техн. наук, доц. А.М. ИВАНЕНКО
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются физико-механические свойства силикатного автоклавированного материала, получаемого с использованием отходов литейного производства, такие как прочность на сжатие, изгиб, деформативность, скорость ультразвука. В качестве отходов литейного производства используются отработанная формовочная смесь, гранулированный ваграночный шлак. Изучено влияние состава сырьевой смеси и технологических параметров производства на изменение прочности на изгиб, скорости распространения в материале ультразвука. Определена взаимосвязь между прочностью материала, скоростью ультразвука, производным параметром, включающим плотность материала и скорость ультразвука. Сделан вывод о возможности контроля прочности изделий на основе неразрушающих методов контроля. Получены зависимости, позволяющие прогнозировать прочностные свойства изделий на основе неразрушающих методов контроля.

Введение. Силикатные автоклавные материалы обладают рядом преимуществ: меньше капиталовложения на организацию производства; ниже материалоемкость и затраты топливно-энергетических ресурсов; доступное сырьё; возможность использования отходов промышленности, что позволяет широко внедрять ресурсосберегающие, энергосберегающие и безотходные технологии [1 – 4].

Однако в силу объективных и субъективных причин при производстве силикатных автоклавных материалов вынуждены применять сырьевые материалы с большой изменчивостью состава и свойств. Это касается как природного, так и техногенного сырья. Известно, что отходы производства обладают высокой нестабильностью качества, выражающейся в статистических колебаниях ее свойств по показателям активности, скорости гидратации, экзотермическому эффекту, непосредственно влияющим на протекание гетерогенной реакции гидротермального синтеза цементирующих веществ. Это приводит к значительным издержкам по качеству получаемых силикатных автоклавных материалов и изделий.

Силикатный бетон представляет собой сложную многофазную систему, состоящую из зерен песка, его тонкоизмельченных частиц и связующего их в прочный монолит цементирующего вещества, пронизанного замкнутыми и сообщающимися между собой порами. Все цементирующее вещество силикатного бетона состоит из новообразований, в общем сходных с теми, которые возникают при безавтоклавном твердении бетона. Но процесс их формирования завершается к концу автоклавной обработки, в то время как в цементном камне обычного бетона сохраняются частицы клинкера, продукты гидратации которых длительное время обеспечивают процесс формирования новообразований. Таким образом, важное значение приобретает степень взаимодействия частиц исходной сырьевой смеси между собой. При этом в мелкозернистом силикатном бетоне отсутствуют крупные каменные включения, что приводит, с одной стороны, к увеличению относительного объема цементирующих новообразований, а с другой – к снижению концентрации напряжений, возникающих из-за различия деформативных свойств цементного камня и зерен включений. Более надежная, чем в обычном бетоне, связь зерен песка с цементирующими новообразованиями, отсутствие крупных включений в виде гравия или щебня, большой объем цементирующих новообразований, законченность процесса формирования определяют основные особенности прочностных и деформативных свойств силикатного бетона.

Как показали исследования [5], ультразвуковой импульсный метод может быть с успехом применен для экспресс-контроля прочности на сжатие, изгиб и установления марки кирпича. При массовом контроле марки кирпича ультразвуковой импульсный метод оказался более эффективным, чем при контроле бетона, из-за выявленной опытами большей чувствительности его к изменениям прочности керамики, чем бетона. Если при испытании бетонов изменению прочности на 1 кг/см^2 соответствует изменение скорости ультразвука на $3 - 4 \text{ м/с}$, то при контроле прочности кирпича на 1 кг/см^2 прочности приходится $15 - 20 \text{ м/с}$ скорости, т.е. чувствительность метода при использовании его в испытаниях кирпича в $5 - 6$ раз выше, чем при испытаниях бетона.

Использование ультразвукового импульсного метода определения марки кирпича экономически выгодно для заводов-изготовителей, так как быстрая оценка качества дает возможность отгрузить заказчику партию с незаниженной прочностью, т.е. по более высокой цене. Следует отметить, что использование ультразвукового метода способствует более глубокому изучению связей акустических показателей (скорость распространения продольной, поперечной и поверхностной волн, логарифмического декремента затухания, полного времени реверберации) с прочностными и деформативными свойствами строительных мелкоштучных изделий.

Деформативные свойства бетона определяются свойствами его компонентов и условиями их взаимодействия. Нарушение сцепления цементного камня с заполнителем – одна из наиболее важных причин разрушения силикатного бетона при различных видах силового воздействия. Поэтому важное значение приобретает возможность проведения экспресс-оценки основных свойств получаемых изделий, прогнозирование эксплуатационных качеств на стадии производства и при необходимости корректировка состава исходной смеси. Такую оценку возможно провести с использованием неразрушающих методов контроля качества изделий, в частности ультразвукового метода.

Мелкоштучные строительные материалы на основе силикатного автоклавированного бетона характеризуются прочностью на сжатие и на изгиб. Прочность на изгиб характеризует полноту реакции гидратации, величину адгезии между «цементным камнем» и заполнителем. Также монолитность материала можно оценить по скорости распространения ультразвука. Кроме того, скорость ультразвука является косвенной характеристикой прочности материала, что позволяет проводить экспресс-оценку марки материала на основании неразрушающих методов определения свойств материалов.

Исследовательская часть. Данная работа является продолжением цикла исследований [6 – 8]. Ранее было установлено, что с использованием отходов литейного производства – отработанной формовочной смеси и гранулированного ваграночного шлака – можно получать силикатный кирпич марок по прочности 125, 150, 175 при соответствии требованиям по морозостойкости, предъявляемым к рядовым стеновым изделиям. Согласно действующим нормативным документам [9] марка силикатного кирпича устанавливается на основании сочетания прочности на сжатие и изгиб.

Цель данной работы – определение прочности на изгиб, скорости распространения ультразвука в материале, оценка деформативных свойств материала, определение зависимостей между прочностными характеристиками и скоростью ультразвука.

Исследование включало в себя подготовку образцов-балочек размерами 40×40×160 мм из составов по 6-факторному эксперименту по плану Рехтшафнера [6 – 8]. На первом этапе проводились исследования скорости ультразвука на образцах-балочках в четырех точках: три поперек балочки и одна вдоль, после чего вычислялась средняя скорость распространения ультразвука. Затем определяли прочность образцов на изгиб с оценкой их деформативности. Исследования выполнялись на образцах-балочках стандартных размеров с наклейкой тензодатчиков на нижнюю поверхность в зоне чистого изгиба, обработку полученных результатов проводили с использованием аналогово-цифрового преобразователя, позволяющего в режиме реального времени получать фактические деформации образцов. Полученные половинки балочек впоследствии были испытаны на прочность при сжатии. Анализ результатов показал, что полученная прочность половинок балочек на сжатие и определенная ранее [6; 8] коррелируют, при этом коэффициент линейной корреляции равняется 0,99.

На основании полученных результатов были построены адекватные математические зависимости при доверительной вероятности $P = 0,95$. Ниже приведены зависимости влияния технологических факторов для показателей:

- прочность на изгиб (МПа)

$$R_{изг} = 6,4 + 1,9 \cdot X_1 - 0,69 \cdot X_2 + 0,58 \cdot X_4 - 0,46 \cdot X_1 \cdot X_3; \quad (1)$$

- скорость распространения ультразвука в материале, м/с

$$V_{36} = 1976 + 290 \cdot X_1 - 397 \cdot X_1^2 + 479 \cdot X_2^2 - 69 \cdot X_1 \cdot X_3 + 62 \cdot X_2 \cdot X_3 - 87 \cdot X_2 \cdot X_5. \quad (2)$$

Полученные результаты прочности на изгиб от состава исходного сырья свидетельствуют, что наибольшее влияние на изменение прочности на изгиб оказывает расход вяжущего (рис. 1) в результате более полного заполнения пор между зёрнами заполнителя, увеличения площади контакта между заполнителем и цементирующим веществом. При этом увеличение доли ваграночного шлака в составе вяжущего приводит к снижению прочности на изгиб, причиной чего может служить недостаточная активность ваграночного шлака при автоклавной обработке. Из технологических параметров наибольшее влияние на прочность оказывает удельное давление прессования сырца, что связано с более плотной упаковкой частиц материала и, как результат, с повышением зоны контакта. Следует отметить, что содержание вяжущего в интервале от среднего до максимального значения обеспечивает минимально требуемую прочность на изгиб согласно действующим нормативным документам [9].

После оцифровки сигналов, полученных с тензодатчиков, и их обработки были построены графики зависимости деформаций от напряжения в балочках. Анализ зависимости деформаций при чистом изгибе от действующих напряжений показал, что для образцов, характеризующихся более полным протеканием реакции гидратации, большим количеством вяжущего, значение предельных деформаций увеличивается. При этом кривые зависимости деформаций от напряжения для наиболее прочных образцов характеризуются наличием горизонтальной ветви деформаций при постоянных нагрузках, косвенно сви-

детельствующей о наличии пластической составляющей деформаций. График зависимости деформаций от напряжений в образцах, обладающих малой прочностью, свидетельствовал о том, что зависимость является более прямолинейной и характерна для хрупких материалов.

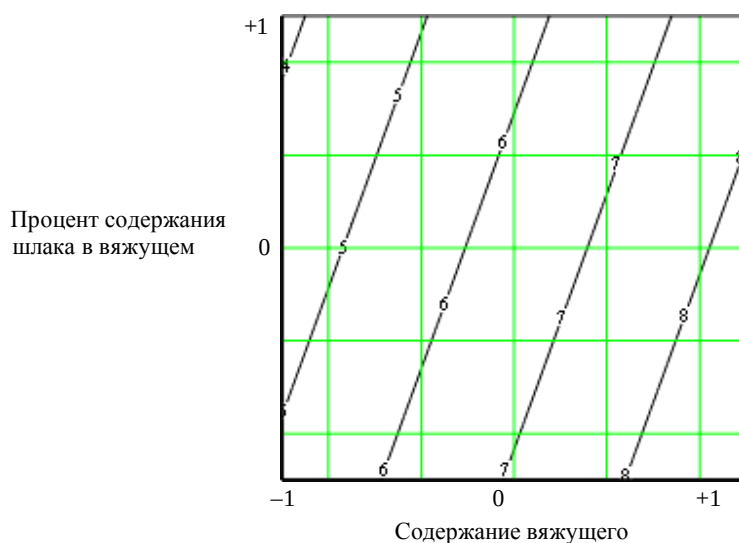


Рис. 1. Влияние содержания вяжущего, расхода шлака от веса извести на прочность образцов-балочек при изгибе

Скорость распространения ультразвука в материале свидетельствует о совершенстве его внутренней структуры, прочности контакта частиц материала между собой. Для оценки влияния технологических параметров на основании полученного уравнения (2) были построены зависимости влияния расхода вяжущего и содержания в нем шлака на скорость распространения ультразвука. Полученные модели представлены на рисунках 2, 3.

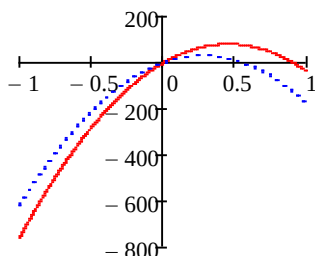


Рис. 2. Влияние количества вяжущего на скорость распространения ультразвука

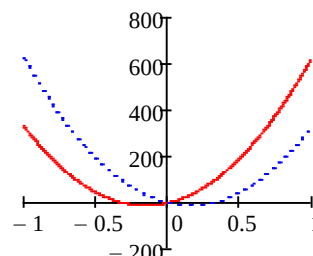


Рис. 3. Влияние процента содержания шлака в вяжущем на скорость распространения ультразвука

Проведенный анализ позволил установить, что наиболее оптимальное содержание вяжущего находится в пределах от среднего до максимального значения варьирования данного фактора, что соответствует области максимальных прочностных и эксплуатационных свойств материала. Использование ультразвукового метода позволяет оценивать прочностные свойства материала и в случае необходимости корректировать производственный процесс. При оценке прочности строительных конструкций с помощью ультразвуковой диагностики находят прямую зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью образцов. Определение зависимости между прочностью силикатных материалов и скоростью ультразвука выполнялось согласно методике, представленной в [10]. На основании полученных результатов были построены зависимости прочности образцов на сжатие и изгиб от скорости ультразвука.

Зависимость прочности на сжатие от скорости ультразвука:

$$R_{сж} = -0,71 + 0,0086 \cdot V_{36} . \quad (3)$$

Зависимость прочности на изгиб от скорости ультразвука:

$$R_{из} = -1,7027 + 0,004 \cdot V_{36} . \quad (4)$$

Полученные зависимости имеют коэффициент корреляции, равный 0,55 – 0,57. После набора статистики на готовых изделиях возможно уточнение данных зависимостей с учетом изменений состава.

Как уже отмечалось, скорость распространения ультразвука является параметром прочности контактов между частицами материала и не учитывает пористость материала, в связи с этим выявлен большой разброс между скоростью ультразвука и прочностью материала в целом. Структурная неоднородность материала оказывает влияние на прочность по той причине, что на границах смежных зон с различными деформативными свойствами при нагружении материала происходит концентрация напряжений. Еще задолго до достижения предельной нагрузки внутри материала в областях концентрации напряжений напряжения могут достигать предела прочности, и происходит образование трещин. Эти трещины в свою очередь являются очагами разрушения всего материала. В случае когда минералогический скелет приобрел высокую прочность, его деформативные и прочностные показатели приблизились по своему значению к соответствующим показателям частиц инертного заполнителя, появляются условия для совместной работы минералогического скелета и заполнителя под нагрузкой.

Известно, что для оценки деформативных свойств материала, косвенной оценки совершенства структуры материала, его прочности применяют динамический модуль упругости, определяемый по значению скорости распространения ультразвука с учетом объемного веса материала и коэффициента Пуассона.

Учитывая сложность определения коэффициента Пуассона на малых образцах, в данной работе предложено использовать условный коэффициент структуры, включающий произведение скорости ультразвука и объемного веса образцов. При определении зависимости между условным коэффициентом структуры и прочностными параметрами установлено, что коэффициент корреляции составляет 0,86 для зависимости прочности на сжатие от предлагаемого коэффициента и 0,91 – для зависимости прочности на изгиб от условного коэффициента структуры. Графики зависимости прочности на сжатие и прочности на изгиб от условного коэффициента структуры представлены на рисунках 4 и 5.

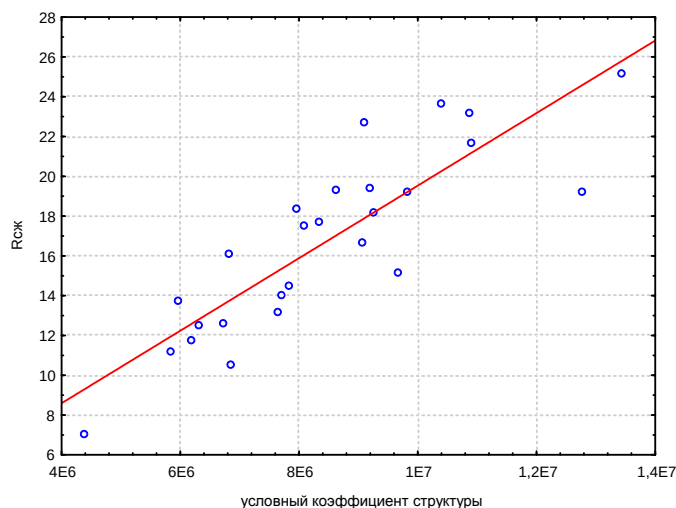


Рис. 4. Зависимость прочности на сжатие от условного коэффициента структуры

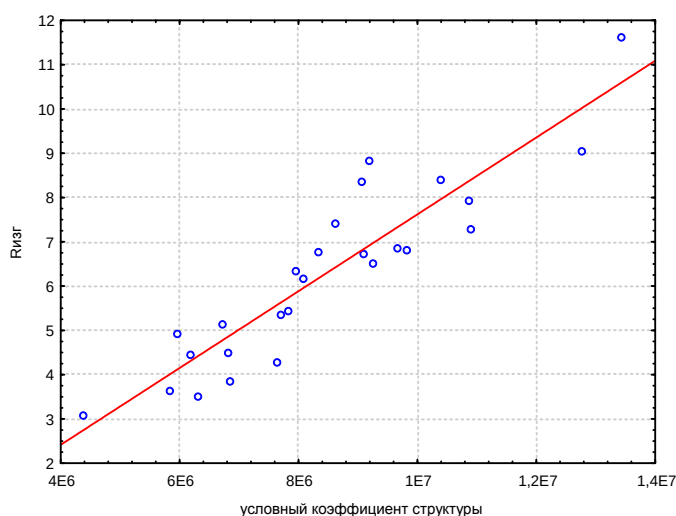


Рис. 5. Зависимость прочности на изгиб от условного коэффициента структуры

Анализ взаимосвязи между прочностными показателями и условным коэффициентом структуры показал, что данный коэффициент для силикатных материалов на основе отходов литейного производства более полно учитывает свойства структуры материала при сравнении с использованием одной скорости распространения ультразвука. Однако, как известно, при насыщении зрелых строительных материалов водой или при наличии адсорбционного размягчения (снижения прочности) скорость распространения ультразвука увеличивается. Вследствие чего оценку прочности силикатных материалов на основе ультразвуковых неразрушающих методов возможно применять только при постоянных параметрах окружающей среды (например, при производстве изделий).

Выводы. Подтверждено, что с использованием отходов литейного производства можно получать силикатный кирпич, обладающий требуемой прочностью на изгиб. Получены зависимости прочности на сжатие и изгиб от скорости распространения ультразвука, условного коэффициента структуры, являющегося произведением скорости ультразвука и плотности материала, которые позволяют прогнозировать свойства силикатного кирпича при производстве. После набора большого числа статистических данных, получения коэффициента Пуассона для силикатного кирпича, получаемого на основе отходов литейного производства, возможен переход на использование при оценке параметров прочности на производстве динамического модуля упругости как величины, более полно учитывающей внутреннюю структуру материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов, М.И. Направления технического прогресса в производстве автоклавных материалов / М.И. Котов, В.Р. Клаусон, П.В. Эвинг // Строительные материалы. – 1985. – № 12. – С. 4 – 6.
2. Домбровский, А.В. Опыт производства, проектирования и применения ячеистобетонных изделий в жилищном, промышленном и сельскохозяйственном строительстве / А.В. Домбровский, Я.М. Паплавский // Строительные материалы. – 1983. – № 6. – С. 1618.
3. Эвинг, П.В. Экономическая эффективность применения и перспективы развития производства изделий из ячеистых бетонов / П.В. Эвинг // Производство и применение силикатных бетонов: сб. тр. НИПИСиликатобетона. – Таллин, 1981. – Вып. 15. – С. 162 – 178.
4. Воронин, А.И. Разработка системы управления параметрами технологии силикатных автоклавных бетонов в условиях нестабильности свойств применяемой извести: автореф. дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.23.05: Строительные материалы и изделия / А.И. Воронин, 2003. – Воронеж. – 25 с.
5. Столярова, Е.А. Исследование ультраакустического метода контроля качества строительной керамики с учетом ее структурных особенностей: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Столярова, 1970. – Фрунзе. – 222 с.
6. Шабанов, Д.Н. Формирование структуры силикатного кирпича, получаемого из отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2011. – № 8. – С. 73 – 76.
7. Шабанов, Д.Н. Исследование структурно-механических свойств отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, А.М. Иваненко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 20 – 22.
8. Шабанов, Д.Н. Физико-механические свойства силикатного кирпича, получаемого на базе отходов литейного производства / Д.Н. Шабанов, В.И. Никитин, А.М. Иваненко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2006. – № 4. – С. 20 – 22.
9. Кирпич и камни силикатные: СТБ 1228-2000 / М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2000. – 14 с.
10. Кирпич и камни силикатные. Ультразвуковой метод определения прочности при сжатии: ГОСТ 24332-88. – М., 1988. – 17 с.

Поступила 04.05.2012

ULTRASOUND USE IN PRODUCTION PROCESS TO CONTROL DURABILITY OF SILICATE BRICK MADE FROM FOUNDRY INDUSTRY WASTE

D. SHABANOV, A. IVANENKO

This paper deals with the physical and mechanical properties of autoclaved silica material obtained with the use of foundry waste, such as compressive strength, flexural strength, deformability, the speed of ultrasound. As a foundry waste using worked-out molding sand, granulated cupola furnace slag. The effect of raw mix and technological parameters of production to changes in flexural strength, the velocity of propagation of ultrasound in the material. Determined the relationship between the strength of the material, the speed of ultrasound derived parameters include the density of the material and the velocity of ultrasound. It is concluded that the possibility of controlling the strength of products based on non-destructive methods of control-ing. The dependences of predicting the strength properties of products based on non-destructive methods of control.

УДК 666.97

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ ВОЛОКНАМИ НИТРОНА

канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА
(Полоцкий государственный университет)

Представлен анализ основных параметров дисперсного армирования бетонов. Показано, что эффективность фибрового армирования зависит от объемного содержания фибры и их механических и термомеханических свойств, соотношения между параметрами фибровой арматуры и параметрами структуры бетонной матрицы, длины фибры и уровня дисперсности армирования. Представлены результаты исследований бетонов, армированных волокнами нитрона. Установлено, что длина и дозировка волокна оказывает существенное влияние на прочностные показатели бетона; введение в мелкозернистый бетон волокон нитрона длиной 60 мм в количестве 5 кг/м³ не приводит к снижению прочности бетона на сжатие и изгиб, обеспечивает повышение ударной выносливости в 1,5 раза и снижает истираемость бетона до 20 %. Показано, что отбракованное полиакрилонитрильное волокно нитрон может применяться в бетонах для повышения истираемости и стойкости к ударным нагрузкам.

Введение. В строительстве находят все большее применение бетоны, армированные волокнами, что связано с положительным влиянием волокон на структуру бетона и его физико-механические характеристики. На стадии структурообразования волокна перераспределяют напряжения при пластической усадке от наиболее опасных зон на весь объем бетона. При нагружении волокна вызывают торможение роста трещин, снижают концентрацию напряжений в окрестности макродефектов, выравнивают напряжения в структуре бетона и их перераспределяют между составляющими бетона. Для постановки эксперимента по изучению эффективности применения новых видов волокон в бетоне должны быть определены параметры дисперсного армирования.

Теоретические исследования. Эффективность дисперсного армирования, как отмечает Ю.М. Баженов, в первую очередь зависит от соотношения модулей упругости армирующих волокон E_f и бетонной матрицы E_c [1]. При $E_f / E_c > 1$ возможно получение фибробетонов с улучшенными прочностными характеристиками на растяжение и сжатие, с повышенной вязкостью разрушения. При $E_f / E_c < 1$ следует ожидать лишь повышения ударной прочности и сопротивления истираемости материала.

Для углеродных волокон верно соотношение $E_f / E_c > 1$. Прочность бетона на растяжение и модуль упругости бетона увеличиваются с увеличением содержания углеродных волокон. В работе [2] показано, что модуль упругости фибробетона составляет около 40 ГПа при содержании углеродных волокон в количестве 10 % по объему, что в два раза выше по сравнению с обычным бетоном; прочность фибробетона на растяжение выше в 1,5 – 1,75 раза.

Значительное повышение прочностных показателей обеспечивают также стальные и базальтовые волокна, относящиеся к группе высокомодульных. Многочисленные исследования [3 – 6] показывают, что сталефибробетон по сравнению с неармированным бетоном и бетоном с традиционными видами армирования имеет более высокие показатели: прочность на растяжение при изгибе – в 2 – 3 раза; прочность на сжатие – до 10 – 50 %; прочность на осевое растяжение – до 10 – 40 %; ударная прочность – в 8 – 12 раз; сопротивление истираемости – до 2 раз; трещиностойкость – в 2 – 3 раза; морозостойкость и водонепроницаемость – не менее чем на класс.

В отличие от высокомодульной, низкомолекулярная фибра обеспечивает незначительное повышение или даже некоторое снижение прочности на сжатие. Согласно результатам исследований [7], прочность на сжатие бетона с полипропиленовой фиброй при оптимальной концентрации увеличилась незначительно, при этом прирост ударной выносливости бетона на крупном заполнителе составил более 5 раз.

Установлено [8], что присутствие полипропиленовой фибры в бетонах и растворах устраняет образование усадочных трещин на раннем этапе на 60 – 90 %, в то время как при применении арматурной сетки – всего на 6 %; металлической фибры – на 20 – 25 % [1].

Увеличение объемного содержания полипропиленовой фибры в бетоне приводит к снижению модуля упругости бетона. Расчеты, выполненные в работе [9], свидетельствуют о том, что при объемном содержании фибры 0,008; 0,016; 0,03 модуль упругости фибробетона составляет 19877 МПа; 19751 МПа; 19526 МПа соответственно. При этом отмечается, что понижение модуля упругости фибробетона способствует его лучшей деформативности, гасит энергию удара и уменьшает напряжения при перепадах температур для конструкций, работающих в стесненных условиях.

Дополнительно повышают характеристики бетона направление и однородность распределения волокон в материале. Бетон, в котором фибра распределена равномерно и выровнена в направлении основных воспринимаемых усилий, наилучшим образом сопротивляется действующей нагрузке. Отмечается, что в идеале фиброволокна должны находиться в каждой секции структурных элементов, образующих бетон [10]. Более того, они должны располагаться вдоль осей правильной решетки, напоподобие тре-

угольной (рис. 1). Продольные оси равны расстоянию S от каждой оси фиброволокна. При этом определено [1; 11], что фибра способна играть свою роль – приостанавливать развитие волосных трещин – лишь на расстоянии между отдельными волокнами не более 10 – 12 мм (максимальная крупность заполнителя, которую не следует превышать). Поэтому применение в бетоне крупного заполнителя, не позволяющего расположить дисперсные волокна достаточно близко друг к другу, снижает эффективность подобного армирования [1].

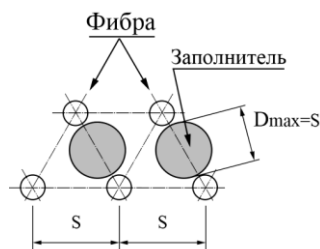


Рис. 1. Расположение частиц заполнителя между волокнами

С повышением объемной концентрации дисперсной фибры физико-механические характеристики фибробетона возрастают до определенного уровня, после достижения которого характеристики снижаются. Когда объем волокна стремится к 1, объем цементной матрицы стремится к 0, и прочность композита также будет нулевой. Поэтому существует определенное соотношение объемов волокна и матрицы, при которых физико-механические характеристики фибробетона будут иметь максимальное значение.

Установлено [12], что в интервале минимального и максимального процента армирования ($\mu_{\min} - \mu_{\max}$) имеет место характерная точка, соответствующая моменту образования фиброцементного каркаса (μ_k), до и после которой поведение композита и его свойства существенно различаются (рис. 2).

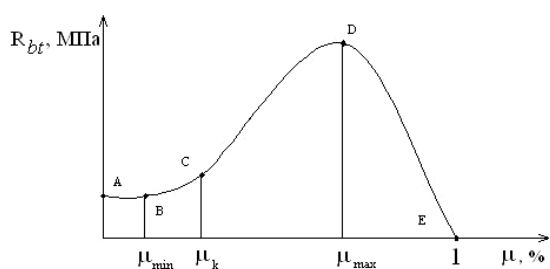


Рис. 2. Характер изменения прочности фибробетона в зависимости от объемной концентрации волокон

Участок АВ характеризует малые насыщения, когда волокна удалены друг от друга на значительные расстояния («зона рассеянного армирования»), прочность фибробетона характеризуется прочностью матрицы и практически не отличается от нее. Участок ВС характеризует «зону сосредоточенного армирования», при растрескивании матрицы волокна способны воспринимать нагрузку и обеспечивать несущую способность фибробетона. Точка С является моментом слияния контактных зон «фибра – матрица» и образования фиброцементного каркаса. На участке CD имеет место дальнейшее, причем более интенсивное, повышение прочности фибробетона, что является результатом уплотнения цементного камня

между волокнами. Точка D соответствует максимальной прочности фибробетона, дальнейшее снижение которой обусловлено уменьшением толщины матричного слоя настолько, что материал проявляет склонность к расслоению даже при небольших нагрузках [12].

Исследования, проведенные в работе [7], показали, что значение оптимальной концентрации для стальной фибры – 1,5 %; синтетической – 1 % от объема бетонной смеси. Более высокая концентрация стальной фибры объяснена более высокой жесткостью (меньшей гибкостью) металлической фибры и тем обстоятельством, что металлическая фибра более грубодисперсна (по значению диаметра) по отношению к синтетической фибре.

В механике композитов с дисперсным армированием при оценке влияния длины волокна (фибры) используется относительный параметр l/d , при этом считается, что наибольший армирующий эффект при использовании высокомодульных волокон достигается при $l/d \approx 60 - 100$. При больших значениях этого параметра (больших длинах волокон) армирующий эффект ухудшается ввиду комкования волокон и ухудшения однородности структуры. Согласно В.В. Бабкову [13], такие условия для игл при $l/d = 100$ наступают при объемной концентрации около 0,3 %.

При использовании низкомодульных синтетических волокон (полипропиленовой, полиамидной фибры) соотношение l/d имеет более высокие значения от 250 до 1500.

Результаты исследований [12] трещиностойкости бетонов с высокомодульными волокнами показали, что если длина волокон $l \gg l_{кр}$, большинство волокон разрываются и вклад энергии вытягивания $W_{выт}$ в общую вязкость разрушения невелик; если $l \leq l_{кр}$, то основной вклад в энергию разрушения композиционного материала вносит энергия по вытягиванию волокон $W_{выт}$. Также установлено, что энергетические затраты на вытягивание волокон существенно больше энергии, связанной с разрушением границ раздела ($W_{выт} > W_{г.р.}$), и чтобы повысить вязкость разрушения, следует применять дискретные волокна $l \leq l_{кр}$.

В итоге сделан вывод: чтобы создать композиционный материал с высокой вязкостью, даже в случаях, когда волокна и матрица по своей природе хрупкие, необходимо выполнять армирование волокнами таких размеров, при которых они вытягиваются из матрицы в процессе трещинообразования.

Показано, что для увеличения энергии по вытягиванию необходимо стремиться к увеличению длины волокна, а следовательно, и к увеличению отношения l/d [12]. Исходя из этого установлено, что отношение длины волокна к его диаметру (l/d) в большей степени влияет на трещиностойкость, чем на прочность фибробетона.

Таким образом, эффективность фибрового армирования зависит от объемного содержания фибры и их механических и термохимических свойств, соотношения между параметрами фибровой арматуры и параметрами структуры бетонной матрицы, длины фибры и уровня дисперсности армирования.

Экспериментальные исследования. Эксперимент по изучению прочностных показателей бетона, армированного волокнами нитрона, проводился в два этапа: первый этап был связан с изучением влияния длины волокна; второй – с изучением влияния дозировки волокна.

Для проведения эксперимента в качестве базового был принят состав (Б-0) со следующим расходом материалов на 1 м^3 : цемента – 450 кг; песка – 1350 кг; воды – 270 кг. Водоцементное отношение составило 0,6. Соотношение цемента и песка Ц:П = 1:3. Применялся портландцемент марки ПЦ500-Д20 ПРУП «Кричевцементосифер»: активность $R_u = 44 \text{ МПа}$; плотность $\rho_u = 3100 \text{ кг/м}^3$; удельная поверхность $S_{уд.ц.} = 2980 \text{ см}^2/\text{г}$. В качестве мелкого заполнителя использовался песок карьера «Боровое», модуль крупности $M_{кр} = 2,3$, насыпная плотность 1650 кг/м^3 , плотность зерен 2650 кг/м^3 , содержание пылеватых и глинистых частиц 2,8 %, пустотность 39,2 %, влажность 0,01 %.

В исследованиях использовались промышленные отходы ПАН волокон (нитрон), образующиеся на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан». Характеристики полиакрилонитрильного волокна (нитрон): плотность 1170 кг/м^3 ; прочность на растяжение 460 – 560 МПа; удлинение при разрыве 16 – 17 %; набухание в воде 2 % [14]. Волокна требуемой длины получали путем нарезки нитей нитрона. Приготовление бетонной смеси осуществлялось путем предварительного перемешивания сухих компонентов (цемента, песка, волокна) и последующего добавления воды.

Прочность мелкозернистого фибробетона при изгибе и сжатии определялась испытанием призм $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$ в соответствии с СТБ ЕН 196-1-2007 [15]. Образцы изготавливались сериями по три образца в каждой. Формы с бетонной смесью уплотняли с пригрузом на лабораторной виброплощадке типа 435А с частотой 50 Гц. Хранение образцов проводилось в камере нормально-влажностного твердения при температуре $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ с относительной влажностью воздуха более 90 %.

При проведении исследований по определению прочности цементного камня, армированного волокном нитрон, дозирование волокна осуществлялось по объему. Относительное содержание объема волокна в единице объема цементного теста (в процентах) определено как коэффициент фибрового армирования по объему (K_v). Было установлено оптимальное значение коэффициента фибрового армирования, равное 0,8 – 1,6 %, при котором прочность на сжатие цементного камня достигла максимального значения и превысила на 20 % прочность цементного камня без волокна.

Таким образом, при исследовании бетонов значение коэффициента фибрового армирования принято равным 1 % от объема цементного теста в бетонной смеси, что составило 5 кг на 1 м^3 бетона. Длина волокна (мм) принята следующей: 2; 20; 60; 80. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние длины волокна нитрон на прочностные характеристики бетона при расходе волокна 5 кг/м^3

Серия	Длина фибры, мм	Прочность при сжатии		Прочность при изгибе	
		МПа	%	МПа	%
Б-0	0	16,24	100	5,65	100
ФБ1-1	2	11,63	71,6	4,53	80,2
ФБ1-2	20	14,28	87,9	4,79	84,7
ФБ1-3	60	17,19	105,8	5,78	102,3
ФБ 1-4	80	16,87	103,9	5,84	103,4

Введение короткого волокна нитрон, относящегося к группе низко модульных (хрупких) волокон, привело к снижению прочностных показателей бетона как на сжатие, так и на изгиб. Значения прочности сопоставимы с контрольными значениями и превышают их от 3 до 6 % только при достижении длины волокна 60 и 80 мм. Следует отметить, что при длине волокна 80 мм появились технологические трудности при попытке провести равномерное распределение волокон в объеме подготавливаемой смеси.

Для проведения второго этапа исследований была принята длина волокна нитрон оптимального значения, равного 60 мм. Коэффициент фибрового армирования принят таким: 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 % от объема цементного теста в составе бетонной смеси, что составило соответственно 1; 2,5; 5; 10 кг волокна на 1 м^3 бетона. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Влияние содержания волокна нитрон на прочностные характеристики бетона при длине волокна 60 мм

Серия	Расход волокна на 1 м^3 , кг	Прочность при сжатии		Прочность при изгибе	
		МПа	%	МПа	%
Б-0	0	16,24	100	5,65	100
ФБ1-1	1,0	16,38	100,8	5,69	100,7
ФБ1-2	2,5	16,68	102,7	5,74	101,6
ФБ1-3	5,0	17,19	105,8	5,78	102,3
ФБ 1-4	10,0	15,79	97,2	5,77	102,1

Анализ результатов испытаний показывает, что при увеличении содержания волокна нитрон длиной 60 мм до значения 5 кг на 1 м³ прочность бетона на сжатие увеличивается на 5,8 %. При дальнейшем увеличении содержания волокна прочность бетона на сжатие начинает снижаться. Прочность бетона на изгиб увеличивается при увеличении содержания волокна в бетоне до максимального значения при расходе волокна 5 – 10 кг на 1 м³ бетона. Можно предположить, что дальнейший рост содержания волокна приведет к существенному снижению прочностных показателей, как следствие уменьшения прослойки цементной матрицы между волокнами.

Таким образом, установлено, что армирующее волокно нитрон не приводит к заметному повышению прочности бетона на сжатие и изгиб. Определено незначительное увеличение прочностных показателей при содержании волокон длиной 60 мм в количестве 5 кг/м³.

Для проведения эксперимента по изучению истираемости бетона, армированного волокном нитрон, использовался бетон состава Б-0, армированный отрезками нитей волокна нитрон длиной 2 мм. Содержание волокна варьировалось от 1 кг до 10 кг на 1 м³ бетона.

На истираемость испытывали образцы размером 40×40×10 мм. Образцы истирались нижней поверхностью в воздушно-сухом состоянии на лабораторной установке ЛКИ-3 по методике ГОСТ 13087-81 [16].

К каждому образцу (по центру) прикладывают сосредоточенную вертикальную нагрузку, соответствующую давлению (60 ± 1) кПа. Через каждые 30 м пути истирания, пройденного образцами (28 оборотов), истирающий диск останавливали. С него удаляли остатки абразивного материала и истертого в порошок бетона, насыпали на него новую порцию абразива и снова включали привод истирающего круга. Указанную операцию повторяли 5 раз, что составило 1 цикл испытаний (150 м пути испытания). После каждого цикла испытаний образец вынимали из гнезда, поворачивали на 90° в горизонтальной плоскости (вокруг вертикальной оси) и проводили следующие циклы испытаний. Всего проводили 4 цикла испытаний для каждого образца (общий путь истирания равен 600 м).

Истираемость бетона на круге истирания, характеризующую потерей массы образца, определяли с погрешностью до 0,1 г/см² для отдельного образца по формуле:

$$G_1 = (m_1 - m_2) / F, \quad (1)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после 4 циклов испытания, г; F – площадь истираемой грани образца, см².

Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3

Влияние содержания волокна нитрон на истираемость бетона

Серия	Расход волокна на 1 м ³ , кг	Истираемость,	
		г/см ²	%
Б-0	0	0,498	100
ФБ 2-1	1	0,450	90,4
ФБ 2-2	2,5	0,418	83,9
ФБ 2-3	5	0,390	78,3
ФБ 2-4	10	0,386	77,5

Анализ экспериментальных данных показал, что истираемость бетона, армированного волокном нитрон, снижается на 9,6; 16,1; 21,7; 22,5 % при содержании волокна соответственно 1; 2,5; 5; 10 кг на 1 м³ бетона.

Широкое распространение получили методы оценки ударной выносливости бетона по величине удельной ударной вязкости. Испытание бетона в этом случае выполняется на вертикальном динамическом копре и заключается в последовательном свободном сбрасывании груза определенной массы с принятой постоянной высоты до разрушения стандартного образца.

Удельная ударная вязкость a (Дж/см³) определяется путем деления суммарной потенциальной энергии, затраченной на разрушение, на объем испытываемого образца

$$a = \frac{mgh}{V} \cdot N, \quad (2)$$

где m – масса свободно падающего груза, кг; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; h – высота падения груза, м; N – число ударов, выдерживаемых образцом до разрушения; V – объем образца, см³

Данная методика испытаний при фиксированных параметрах m , h , V и одинаковых условиях на опорных площадках позволяет по характеристике a сравнивать бетоны по ударной выносливости.

Удельная ударная вязкость определялась при постоянной высоте сбрасывания груза $h = 0,26$ м. при массе падающего груза 2,046 кг. Испытывались образцы размером $40 \times 40 \times 40$ мм, изготовленных из бетона состава Б-0, армированного отрезками нитей волокна нитрон длиной 2 мм.

Разрушение образцов бетона оценивалось по количеству ударов, соответствующему формированию сквозной трещины на всю высоту образца.

Результаты испытаний представлены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние содержания волокна нитрон на удельную ударную вязкость бетона

Серия	Расход фибры на 1 м^3 , кг	Прочность при сжатии, МПа, в 180 сут	Среднее количество ударов до разрушения образца	Удельная ударная вязкость, Дж/см ³
Б-0	0	24,5	17	1,39
ФБ 2-1	1	17,5	21	1,71
ФБ 2-3	5	13,5	25	2,04

Характер разрушения образцов бетона представлен на рисунке 3.

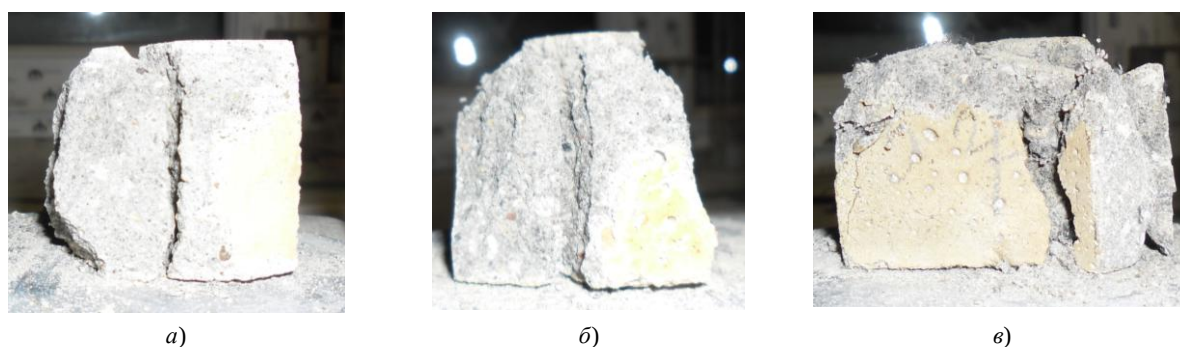


Рис. 3. Внешний вид разрушенных образцов бетона:
а – без фибры после 17 ударов; б – с расходом фибры 1 кг/м^3 после 21 удара;
в – с расходом фибры 5 кг/м^3 после 25 ударов

Армирование бетона волокном нитрон обеспечивает увеличение ударной выносливости бетона в 1,5 раза при расходе волокна 5 кг на 1 м^3 бетона. Следует отметить, что существует начальная стадия повреждения образцов с формированием микротрещин в бетоне под оголовником и околами углов по грани образца-куба под оголовником. Эта стадия наступает достаточно рано, уже после 2 – 3 ударов и имеет место в равной мере как у неармированных, так и у армированных волокном нитрон образцов. По-видимому, единообразное поведение тех и других образцов обусловлено слабым армированием углов и граней образцов-кубов бетона из-за неудовлетворительного распределения волокна в этих зонах.

На второй стадии нагружения повреждение и трещинообразование образцов неармированного и армированного бетонов различается существенно. Неармированный бетон разрушается с формированием первых признаков трещинообразования на боковых гранях образца незадолго до разрушения, которое происходит с образованием магистральной вертикальной трещины при ее минимальном ветвлении. Армированный бетон разрушается с формированием множественных трещин при их характерном ветвлении, что указывает на его более высокую вязкость, более высокую энергоемкость процесса разрушения и в целом предопределяет высокую ударную выносливость армированного бетона по отношению к исходному неармированному бетону.

В работе И.В. Боровских отмечается, что дисперсное армирование не только повышает разрушающее напряжение, но и меняет характер деформирования бетона, многократно увеличивая долю псевдопластических деформаций при нагружении и тем самым работу разрушения, что свойственно всем фиброцементным бетонам и что в свою очередь предопределяет их высокую ударную прочность [17].

Заключение. Длина волокна нитрон оказывает существенное влияние на прочностные показатели бетона. Армирование бетона волокнами длиной до 40 мм приводит к снижению прочности бетона на сжатие и изгиб. Оптимальными критериями армирования бетона волокном нитрон, не приводящими к снижению прочностных показателей, являются длина волокна, равная 60 мм, и расход волокна нитрон в количестве 5 кг на 1 м^3 бетона. Истираемость бетона, армированного волокном нитрон, снижается при увеличении содержания волокон. При оптимальном расходе волокна нитрон 5 кг на 1 м^3 бетона истираемость

уменьшилась на 21,7 %. Армирование бетона волокном нитрон меняет характер деформирования бетона, обеспечивает более высокую вязкость и более высокую энергоемкость процесса разрушения, что в целом увеличивает ударную выносливость бетона в 1,5 раза по сравнению с неармированным бетоном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учеб. пособие для вузов / Ю.М. Баженов. – М.: Высш. шк., 1987. – 415 с.
2. Варшавский, В.Я. Углеродные волокна – эффективный наполнитель композиционных материалов в строительстве / В.Я. Варшавский // Холдинговая компания «Композит» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.compozit.su>.
3. Пухаренко, Ю.В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: дис.... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Ю.В. Пухаренко. – СПб., 2004. – 315 с.
4. Рабинович, Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны: научное издание / Ф.Н. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.
5. Пухаренко, Ю.В. Высокопрочный сталефибробетон / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 9. – С. 40 – 41.
6. Вахмистров, А.И. Высокопрочный сталефибробетон для высотного строительства / А.И. Вахмистров [и др.] // Вестн. строительного комплекса. – 2007. – № 10(49). – С. 51.
7. Парфенов, А.В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А.В. Парфенов. – Уфа, 2004. – 19 с.
8. Фибра полипропиленовая // Фабрика тепла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fabrika.teplo43.ru/home/102.html>.
9. Леонович, И.А. Применение фибробетона в строительстве и его упругие свойства / И.А. Леонович, Т.С. Самолько // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. тр.: в 2 ч. Ч. 1. Бетонные и железобетонные конструкции; редкол.: М.Ф. Марковский [и др.]. – Минск: Стринко, 2007. – С. 239 – 249.
10. Базанов, С.М. Улучшение качества бетона на основе использования смешанных видов волокон / С.М. Базанов, М.В. Торопова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://timas.at.ua/publ/>.
11. Баженов, Ю.М. Высокопрочный мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций / Ю.М. Баженов. – М.: Гостройиздат, 1963. – 128 с.
12. Голубев, В.Ю. Высокопрочный бетон повышенной вязкости разрушения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В.Ю. Голубев. – СПб., 2009. – 18 с.
13. Бабков, В.В. Технологические возможности повышения ударной выносливости цементных бетонов / В.В. Бабков [и др.] // Строительные материалы. – 2003. – № 10. – С. 19 – 20.
14. Волокна химические. Большая Советская Энциклопедия // Академик [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dic.academic.ru>.
15. Методы испытания цемента. Ч. 1. Определение прочности: СТБ ЕН 196-1-2007. – Введ. 01.08.07. – Минск: Гостандарт, 2007. – 31 с.
16. Бетоны. Методы определения истираемости: ГОСТ 13087-81. – Введ. 01.01.82. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 10 с.
17. Боровских, И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / И.В. Боровских. – Казань, 2009. – 28 с.

Поступила 21.05.2012

EFFICIENCY OF NITRON POLYACRYLIC FIBER REINFORCEMENT IN BETONS

L. PARFENOVA

The analysis of key parametres of disperse reinforcement of concrete is made. It is shown, that efficiency of fibre reinforcement depends on a volumetric content of a fibre and their mechanical and thermochemical properties, a relationship between parametres of fibre armature and parametres of structure of a concrete matrix, length of a fibre and level of dispersity of reinforcement. Results of researches of the concrete reinforced by nitron polyacrylic fiber are presented. It is determined, that the length and a fibre proportioning makes essential impact on strength parametres. It is shown, that adding of nitron polyacrylic fiber in a fine concrete with length of 60 mm in amount of 5 kg/m³ does not cause strength reduction, provides raise of shock endurance in 1,5 times and reduces abrasability to 20 %. It is shown, that the sorted out nitron polyacrylonitrile fibre can be applied in concrete to raise abrasability and durability to shock loads.

УДК 693.547

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ
НА СВОЙСТВА ЭМУЛЬСИОННЫХ СМАЗОК ДЛЯ ОПАЛУБКИ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СБОРНОГО И МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

Е.С. МАКСИМОВИЧ, д-р техн. наук, доц. В.Н. САКЕВИЧ
(Витебский государственный технологический университет)

Представлены результаты исследований влияния ультразвукового воздействия на структуру эмульсионных смазок для опалубки при производстве сборного и монолитного железобетона, а также на коэффициент поверхностного натяжения и показатель преломления технологических жидкостей, входящих в состав эмульсола и их смесей. Установлены закономерности модификации ультразвуковым воздействием свойств технологических жидкостей, входящих в состав эмульсола. Ультразвуковое воздействие позволяет получить микроэмульсию даже на основе нефтяного экстракта, что невозможно без применения ультразвуковой модификации. Проведена ценовая оптимизация состава эмульсола с учетом закономерностей модификации свойств эмульсола ультразвуковым воздействием. Применение целенаправленной модификации ультразвуковым воздействием технологических жидкостей при производстве эмульсола позволяет снизить стоимость конечного продукта.

Введение. При производстве железобетонных изделий в формах, а также при монолитном строительстве одной из операций является смазка форм для разборной опалубки. Готовая смазка должна отвечать целому комплексу требований:

- повышенная адгезия к металлу (для удержания на вертикальных поверхностях форм) и пониженная адгезия к бетону (для облегчения распалубки изделий без их повреждения);
- исключение возможности появления пятен и воздушных пор на поверхности изделий, прилегающих к форме, и снижения прочности и плотности бетона в поверхностных слоях;
- возможность механизации и автоматизации приготовления и нанесения смазки на поверхность форм;
- отсутствие необходимости в очистке поверхности форм от остатков бетона;
- смазка должна не только не вызывать коррозии металла форм, но и обладать антикоррозионными защитными свойствами, не содержать летучих вредных для здоровья веществ, быть безопасной в пожарном отношении. Наконец, в составе смазки не должно быть дорогостоящих и дефицитных материалов.

Цель настоящей работы – создание эмульсионной смазки и способа её получения, позволяющих снизить стоимость конечного продукта как за счет использования более дешевого сырья, так и за счет менее трудоемкой и энергоёмкой технологии, повышение производительности процесса, а также расширить сырьевую базу производства.

Основная часть. Обзор сырьевой базы показал, что наиболее дешевым источником для производства смазки могут служить продукты переработки нефти. В результате анализа установлено, что в производстве масел и присадок имеются продукты, которые могли бы стать основой для производства антиадгезионных смазок – это парафин, петролатум, масла и присадки различных типов. С другой стороны, выбор в качестве сырьевого источника продукта переработки нефти усложняет задачу тем, что состав нефтепродуктов сложен с химической точки зрения, так как нефть различается по составу в зависимости от месторождений, а продукты ее переработки еще и от применяемой технологии. Кроме того, как известно, минеральные масла и парафины эмульсифицируются с трудом и эмульсии их не всегда устойчивы. При применении таких продуктов качество эмульсии будет зависеть от выбора эмульгатора и разработки метода получения эмульсии. Нужно отметить, что получение именно эмульсии преследует цель достичь противопожарной безопасности продукта.

В первую очередь были определены эмульгаторы, которые будут использоваться при приготовлении эмульсий, обладающие наилучшими свойствами. С учетом доступности и цены были использованы:

- оксигетилированный алкилбензол неонол АФ9-12;
- полиэтиленгликолевый эфир жирных спиртов ОС-20;
- сульфенол отбеленный (алкилбензолсульфонат натрия);
- натриевая соль жирных кислот (мыло хозяйственное);
- синтанол ДС-Na;
- триэтаноламин.

С учетом критической концентрации мицеллообразования для этих веществ были проведены эксперименты по приготовлению эмульсии на основе минерального масла И-40, которые показали, что наилучшей устойчивостью обладают эмульсии, приготовленные с применением в качестве эмульгатора неонла АФ9-12 с добавками жирных кислот. Устойчивость их составляла до 2 суток, с образованием слоя

сливок и небольшой коалесценцией. Эмульсии готовились в лабораторных условиях с применением лабораторного оборудования. Изменялись концентрации эмульгатора, масла, порядок смешения компонентов, температура приготовления. Изучались устойчивость и размеры диспергируемой фазы.

С учетом полученных при этом результатов были испытаны эмульсии, приготовленные из продуктов производства Новополоцкого нефтеперерабатывающего завода: присадок С-150 и НКГ, представляющих собой кальциевую соль нафтенных сульфокислот которые используют в качестве моющей и диспергирующей присадки к моторным маслам и в качестве добавки к мазуту.

Проведены опыты по приготовлению эмульсий с применением всех вышеперечисленных эмульгаторов. После приготовления эмульсии практически сразу коалесцировали. Это подтверждает то, что С-150 хорошо растворяется в масле и образует при этом в нем обратные эмульсии с водой. Поэтому приготовить из нее прямую эмульсию, естественно, не получилось. Но с учетом содержания в присадке кальция была сделана попытка заменить содержащийся кальций эквивалентным количеством натрия обменной реакцией с кальцинированной содой. При этом была получена устойчивая обратная эмульсия с водой, светло-коричневого цвета и немного большей вязкости, чем исходная присадка. Присадка НКГ обладает более сильным неприятным запахом и большим содержанием отходов производства присадок. По этой причине после нескольких опытов с получением нежелательных результатов работы с ней решено было не продолжать.

Были проведены также исследования на предмет получения эмульсий с использованием базового и нейтрального масел, сукцинимидной и алкилфенольных присадок. Исследования, показали, что наилучшей устойчивостью обладают эмульсии, приготовленные с применением в качестве эмульгатора неона АФ9-12 с добавками жирных кислот.

Проведенные работы по получению эмульсий подтверждают встречающееся в специальной литературе утверждение, что минеральные масла плохо поддаются эмульсифицированию даже при использовании самых лучших эмульсификаторов.

Полученные эмульсии на основе неона и минерального базового масла ВД-3 не обладали высокой седиментационной устойчивостью, т.е. через непродолжительное время, от получаса до суток, происходило расслаивание эмульсии на две части: верхнюю, так называемые сливки, и нижнюю, менее концентрированную эмульсию.

В литературе приводятся составы, которые содержат помимо минеральной составляющей жирные кислоты, природные или синтетические. Исследования показали, что эмульсии, приготовленные из смеси минерального масла и жирной кислоты, обладают высокой седиментационной устойчивостью. Эмульсия, приготовленная на основе масла ВД-3, неона и жирной кислоты, устойчива в течение более месяца, на поверхности не образуется после отстоя слоя масла, а слой сливок, если и образуется, то небольшой.

В качестве источника жирной кислоты использовались образцы жирных кислот для промышленной переработки ТУ РБ 190239501.035 производства ОАО «Гомельский жировой комбинат» с различной глубиной содержания олеиновой кислоты и влаги (№ 1 – 92,75 %; № 2 – 87,98 %; № 3 – 85,54 %). Жирные кислоты на комбинате получают из soap-стоков и используют для производства хозяйственного мыла. Учитывая небольшую стоимость их как вторичного продукта, получаемого из отходов основного производства комбината, использование этих жирных кислот в качестве компонента антиадгезионных смазок было бы весьма целесообразно.

На первом этапе для достижения поставленной цели проводилась работа по получению устойчивой эмульсии на основе минерального масла ВД-3, неона АФ9-12 и полученных образцов жирных кислот производства ОАО «Гомельский жировой комбинат». Установлено, что при смешении указанных компонентов в пропорции 4:1:2 образуется эмульсол, при растворении которого в воде при 10 % концентрации образуются устойчивые прямые эмульсии (типа «масло в воде»).

На рисунке 1 приведены фотоснимки различных эмульсий после выдержки в течение 1 месяца.

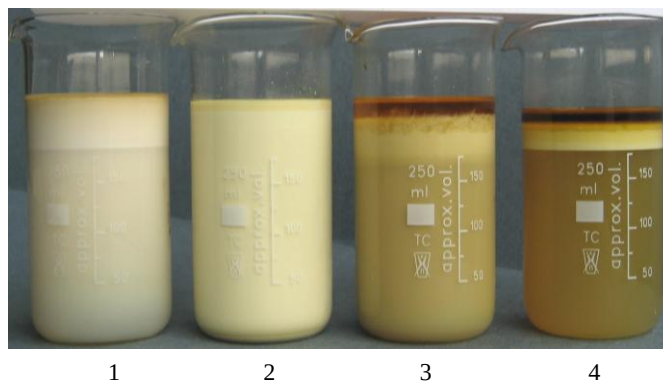


Рис. 1. Полученные эмульсии после выдержки в течение одного месяца

На рисунке 1 под № 1 представлена 10 % эмульсия на основе эмульсола ВЛВ-15 (Челябинск, Россия), № 2 – 10 % эмульсия на основе масла ВД-3 и жирных кислот, № 3 – 10 % эмульсия рапсового масла в воде с триэтаноламином в качестве эмульгатора, № 4 – 10 % эмульсия рапсового масла в воде с неолоном АФ9-12 в качестве эмульгатора. Отметим, что в эмульсии на основе эмульсола ВЛВ-15 образуется значительных слой сливок, в то время как в образце эмульсии под № 2 этот слой незначителен. Эмульсии под № 3 и 4 неустойчивы, седиментируют и коалесцируют.

Образцы эмульсий на основе рапсового масла были получены с целью поиска замены минеральному маслу ВД-3.

Известно, что минеральные масла вызывают множественные проблемы в экологическом плане. Кроме того, в Республике Беларусь есть несколько заводов, производящих рапсовое масло. Замена их на биоразлагаемые продукты была бы желательна, но для эмульсола, используемого для смазки форм при производстве ЖБИ, нет отходов – эмульсия вступает в реакцию с поверхностью бетона. Следовательно, вопрос, какое масло применяется в экологическом плане, не актуален. Также следует отметить, что на данный момент рапсовое масло дороже минерального и имеет место его определенный дефицит.

Однако отметим, что полученные отрицательные результаты в отношении эмульсий на основе рапсового масла не означают бесперспективность получения устойчивых эмульсий на его основе, а лишь только то, что для этого требуется разработка другого состава и применение других эмульгаторов.

Проведенное испытание 10 % эмульсии на основе масла ВД-3, жирной кислоты и неолола в качестве антиадгезионной смазки при производстве бетонных изделий показало, что приготовление ее из эмульсола растворением в воде имеет отрицательную сторону по сравнению с ВЛВ-15, так как этот эмульсол хуже растворяется в воде. При недостаточно хорошем перемешивании или при низкой температуре воды образуются хлопья, в результате чего на поверхности изделия образуются жирные пятна. На рисунке 2, а показана структура эмульсии на основе масла ВД-3, жирной кислоты и неолола.

Известно, что ультразвуковые колебания способны изменять свойства эмульгатора, в частности жирной кислоты [1]. Были проведены дополнительные исследования по влиянию ультразвуковых колебаний на структуру эмульсии на основе масла ВД-3, жирной кислоты и неолола и на качество приготовленной эмульсии. На рисунке 2, б показана структура эмульсии на основе масла ВД-3, жирной кислоты и неолола после воздействия ультразвуковыми колебаниями на концентрат.

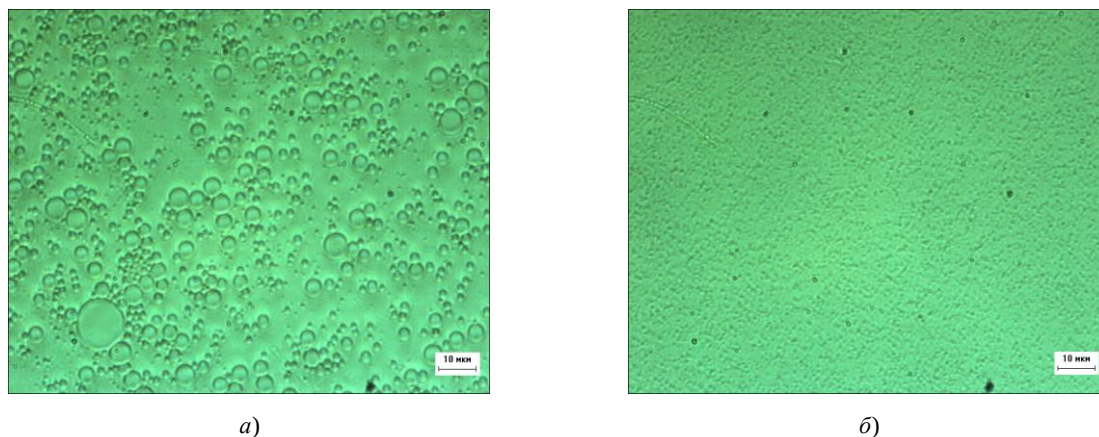


Рис. 2. Фазовый состав эмульсола:

а – 10 % эмульсия на основе масла ВД-3, жирной кислоты и неолола;

б – 10 % эмульсия на основе масла ВД-3, жирной кислоты

и неолола (концентрат эмульсола подвергнут ультразвуковой обработке по разработанной методике)

Как видно из рисунка 2, б, оптическая микроскопия не позволяет определить размеры частиц после ультразвуковой обработки, поэтому определение размера частиц эмульсола проводилось методами турбидиметрии на приборе КФК-3 [2].

Турбидиметрия основана на измерении интенсивности света, проходящего через кювету с исследуемым дисперсным веществом. Следует отметить, что этот метод применим только для «белых» золей, т.е. неокрашенных дисперсных систем (метод базируется только на светорассеянии). Калибровочная кривая Геллера, которая может быть использована для графического определения радиуса r частиц, приведена на рисунке 3, б. Для радиуса частиц от 50 до 100 нм калибровочная зависимость имеет линейный вид и может быть описана уравнением: $\chi = 3,1 - 2,16 \cdot 10^{-2}(r - 50)$. Это уравнение справедливо для $\chi = 2,0 - 3,1$.

Алгоритм определения размеров частиц дисперсных систем заключается в следующем:

1) по экспериментальным данным строится прямая в координатах $\lg D - (-\lg \lambda)$ (рис. 3, а), где $D = \lg I_0 / I_{II}$ – оптическая плотность (I_0 – интенсивность падающего света; I_{II} – интенсивность света, прошедшего через систему); λ – длина волны падающего света (450,2 ÷ 690,4 нм). Тангенс угла наклона прямой равен коэффициенту χ , в нашем случае $\chi = 2,676$ (см. рис. 3, а);

2) по значению χ находим r (рис. 3, б), в нашем случае $r = 50 + (3,1 - \chi) \cdot 10^2 / 2,16 \approx 70$ нм, или средний диаметр частиц равен 140 нм.

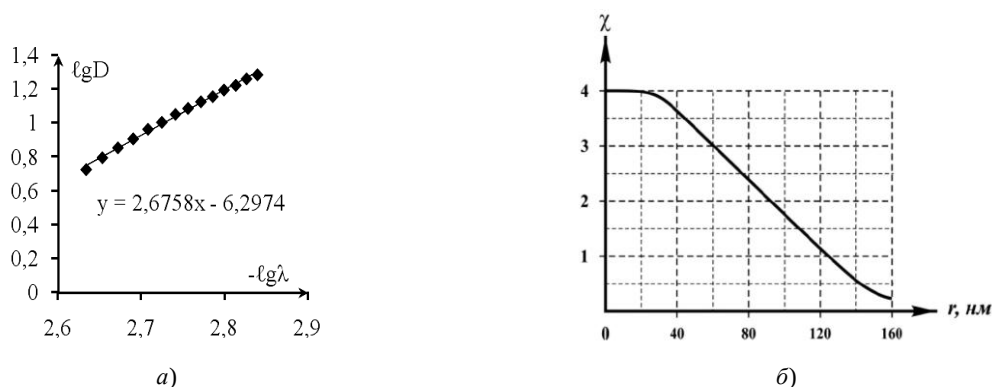


Рис. 3. Обработка экспериментальных данных для определения средней величины размера частиц r : а – зависимость $\lg D = f(-\lg \lambda)$; б – калибровочная кривая Геллера

В процессе исследований установлено, что ультразвуковое воздействие активизирует олеиновую кислоту, что позволяет получить микроэмульсию даже на основе нефтяного экстракта, что невозможно без применения ультразвуковой активации. Следует отметить, что жирные кислоты, полученные из соап-стоков и используемые для производства хозяйственного мыла, более эффективны при ультразвуковой активации, чем химически чистые [1]. Учитывая небольшую стоимость их как вторичного продукта, получаемого из отходов основного производства комбината, использование этих жирных кислот в качестве компонента антиадгезионных смазок весьма целесообразно.

В процессе подготовки к практическому использованию выполнен комплекс исследований по ценовой оптимизации состава разрабатываемой эмульсии.

В таблице 1 приведена стоимость компонентов, взятых за основу для производства антиадгезионных смазок по результатам предварительных исследований [3; 4].

Таблица 1

Стоимость технологических компонентов, пригодных для приготовления эмульсола

Название компонента	Цена за 1 т, \$
Масло ВД-2	436
Масло И-40	775
Нефтяной экстракт (НЭ)	416
Жирные кислоты растительных масел (ЖКРМ)	533
Оксиэтилированный алкилбензол неонол АФ9-12	2667
Олеиновая кислота (техническая)	1333

Исходя из стоимости компонентов (см. табл. 1) проведены исследования по получению эмульсола на основе экстракта нефтяного и жирных кислот растительных масел как самых дешевых компонентов и изучению устойчивости полученных эмульсий к расслоению. Следует отметить, что ультразвуковому воздействию подвергалась смесь технологических компонентов эмульсола, а при получении эмульсии размешивание эмульсола проводилось чисто механически, лопаткой в холодной водопроводной воде. Получить устойчивую эмульсию без неонла АФ9-12 на основе экстракта нефтяного и жирных кислот растительных масел даже под действием ультразвука не удалось.

Экспериментально была установлена минимальная концентрация неонла АФ9-12 как самого дорогого компонента для получения устойчивой эмульсии.

Для ответа на вопрос, что происходит со смесью при ультразвуковом воздействии, был проведен рефрактометрический анализ [5] технологических жидкостей и их смесей в различной комбинации для оптимального состава.

Рефрактометрический анализ основан на измерении показателя преломления (рефракции) n вещества образцов. Показатель преломления вещества n зависит от его природы, а также от длины волны света и от температуры. Для монохроматического света при постоянной температуре коэффициент рефракции n среды зависит от химического состава и структуры вещества. Результаты рефрактометрических измерений показателя преломления (рефракции) n вещества приведены в таблице 2 и проводились на рефрактометре ИРФ-22 методом, основанным на явлении полного внутреннего отражения света (точность порядка $2 \cdot 10^{-4}$).

Таблица 2

Рефрактометрические измерения показателя преломления

Состав	Показатели преломления		
	без ультразвука, n_0	с обработкой ультразвуком, n_3	$\Delta = n_3 - n_0$
Нефтяной экстракт	1,5505	1,5512	$7 \cdot 10^{-4}$
Жирные кислоты растительных масел	1,4722	1,4714	$-8 \cdot 10^{-4}$
Неонол	1,4852	1,4844	$-8 \cdot 10^{-4}$
Смесь нефтяной экстракт + жирные кислоты растительных масел (2:1)	1,5260	1,5236	$-24 \cdot 10^{-4}$
Смесь нефтяной экстракт + неонол (8:3)	1,5425	1,5390	$-35 \cdot 10^{-4}$
Смесь жирные кислоты растительных масел + неонол (4:3)	1,4771	1,4768	$-3 \cdot 10^{-4}$
Смесь нефтяной экстракт + жирные кислоты растительных масел + неонол (8:4:3)	1,5172	1,5150	$-22 \cdot 10^{-4}$

Анализ таблицы 2 показывает, что существенное влияние ультразвук оказывает на структуру смеси нефтяного экстракта с эмульгаторами – неонолом и жирными кислотами растительных масел. Дополнительно исследовали изменение коэффициента поверхностного натяжения технологических жидкостей и их смесей в различной комбинации для оптимального состава.

Коэффициент поверхностного натяжения определяли методом втягивания пластины (метод Вильгельми). Преимущество данного метода – простота и удобство измерений. Схема и установка по определению коэффициента поверхностного натяжения методом пластины Вильгельми представлена на рисунках 4, 5 соответственно.

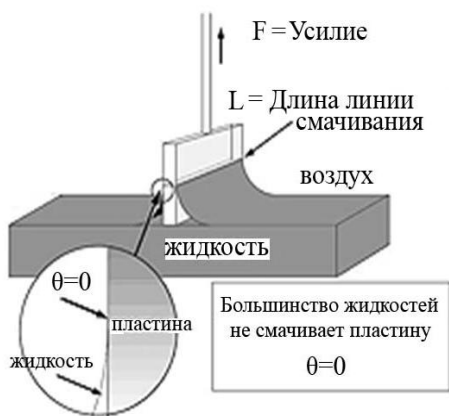


Рис. 4. Схема определения коэффициента поверхностного натяжения методом пластины Вильгельми

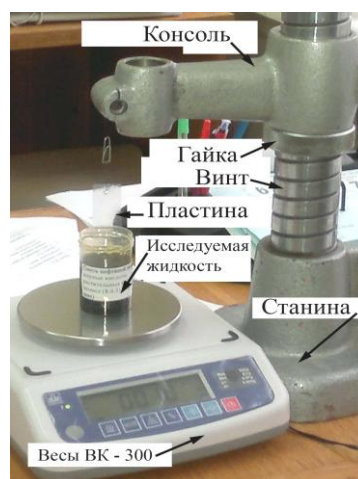


Рис. 5. Экспериментальная установка по определению коэффициента поверхностного натяжения методом пластины Вильгельми

В методе втягивания пластины определяется сила, которая необходима для уравнивания тонкой пластинки шириной L , погруженной в жидкость. Обычно используется полностью смачиваемая

жидкостью пластинка, и поверхностное натяжение рассчитывается из выражения: $\sigma = F / 2L$, где F – сила, втягивающая пластинку в жидкость, $L = 2$ см – ширина пластины. Силу F измеряли с помощью весов ВК 300 (ошибка измерений силы составляет $\pm 0,005$ г).

Точность метода лимитируется только точностью весоизмерительных устройств, чувствительность которых весьма велика. Могут вызвать трудности изготовление тонкой пластинки из полностью смачиваемого материала. Поскольку для толстой пластинки приходится учитывать Архимедову выталкивающую силу и вводить поправку на изменение уровня жидкости в сосуде, то необходимость учета этих поправок усложняет измерения и снижает точность.

Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения представлены в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты поверхностного натяжения

Состав	Измеряемая сила F , г		Коэффициент поверхностного натяжения, г/см	
	без ультразвука	с обработкой ультразвуком	без ультразвука	с обработкой ультразвуком
Нефтяной экстракт	0,130	0,135	$325 \cdot 10^{-4}$	$337,5 \cdot 10^{-4}$
Жирные кислоты растительных масел	0,125	0,125	$312,5 \cdot 10^{-4}$	$312,5 \cdot 10^{-4}$
Неонол	0,140	0,140	$350 \cdot 10^{-4}$	$350 \cdot 10^{-4}$
Смесь нефтяной экстракт + жирные кислоты растительных масел (2:1)	0,135	0,130	$337,5 \cdot 10^{-4}$	$325 \cdot 10^{-4}$
Смесь нефтяной экстракт + неонол (8:3)	0,140	0,140	$350 \cdot 10^{-4}$	$350 \cdot 10^{-4}$
Смесь жирные кислоты растительных масел + неонол (4:3)	0,135	0,130	$337,5 \cdot 10^{-4}$	$325 \cdot 10^{-4}$
Смесь нефтяной экстракт + жирные кислоты растительных масел + неонол (8:4:3)	0,135	0,140	$337,5 \cdot 10^{-4}$	$350 \cdot 10^{-4}$

Анализ таблицы 3 показал, что на коэффициент поверхностного натяжения технологических жидкостей и их смесей обработка ультразвуком практически не влияет.

Была приготовлена опытная партия эмульсии на основе экстракта нефтяного, жирной кислоты растительных масел и неонола по разработанной технологии с применением ультразвуковой обработки и проведены производственные испытания эмульсии на заводе крупнопанельного домостроения (г. Витебск).

На рисунке 6 показана поверхность бетонной плиты, полученная при использовании антиадгезионных эмульсионных смазок.



Рис. 6. Образец поверхности бетонной плиты после применения в качестве смазки для разборной стальной опалубки эмульсии на основе экстракта нефтяного, жирной кислоты растительных масел и неонола (концентрат эмульсола)

Заключение. В результате нанесения эмульсии на поверхность опалубки образуется разделительный слой, который предотвращает прямое соединение между опалубкой и готовым изделием, а также делает возможной легкую, быструю и чистую распалубку, не оставляет масляных пятен и каверн на поверхности бетона.

Установлены закономерности модификации ультразвуковым воздействием свойств технологических жидкостей, входящих в состав эмульсола. Применение целенаправленной модификации технологических жидкостей при производстве эмульсола позволяет снизить стоимость конечного продукта как за счет использования более дешевого сырья, так и за счет менее трудоемкой и энергоёмкой технологии, повышает производительность процесса, а также расширяет сырьевую базу производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Некоторые особенности изменения свойств олеиновой кислоты после ультразвуковой обработки / И.В. Дребенкова [и др.] // Вестн. Витебск. гос. технолог. ун-та. – 2010. – Вып. 19 – С. 111 – 117.
2. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / под ред. Ю.Г. Фролова и А.С. Гродского. – М.: «Химия», 1986. – 216 с.
3. Иваненко, В.В. Разработка технологии получения и рецептуры эмульсионных смазок на основе нефтехимических продуктов промышленных предприятий Республики Беларусь для опалубки при производстве сборного железобетона / В.В. Иваненко, В.Н. Сакевич // Вестн. Витебск. гос. технолог. ун-та; гл. ред. В.С. Башметов. – Витебск, 2009. – Вып. 17. – С. 118 – 123.
4. Свойства эмульсионных смазок для опалубки при производстве сборного и монолитного железобетона при ультразвуковом воздействии / П.С. Зачепило [и др.] // Вестн. Витебск. гос. технолог. ун-та. – 2010. – Вып. 19. – С. 117 – 122.
5. Иоффе, Б.В. Рефрактометрические методы химии / Б.В. Иоффе. – Л.: Химия, 1983. – 352 с.

Поступила 02.02.2012

INFLUENCE OF ULTRASONIC PROCESSING ON PROPERTIES GREASING OF EMULSION FOR A TIMBERING BY MANUFACTURE OF MODULAR AND MONOLITHIC FERRO-CONCRETE

E. MAKSIMOVICH, V. SAKEVICH

Researches spent with use of oil И-40, ВД-3, an oil extract and rape oil. Taking into account availability and the price wide enough spectrums of emulsifiers has been used. Emulsions prepared in laboratory conditions. Influence of ultrasonic influence on emulsion structure, and also on factor of a superficial tension and an indicator of refraction of the technological liquids which are a part emulsion and their mixes is investigated. Laws of updating by ultrasonic influence of properties of technological liquids a part of emulsion are established. Ultrasonic influence allows receiving a micro emulsion even on the basis of an oil extract that is impossible without application of ultrasonic updating. Price optimization of structure of emulsion taking into account laws of updating of properties of emulsion is spent by ultrasonic influence. Application of purposeful updating by ultrasonic influence of technological liquids by manufacture of emulsion allows to lower end-product cost.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 622.692:658

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОПРОСОВ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

**д-р техн. наук, проф. В.К. ЛИПСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО,
канд. техн. наук, доц. Д.П. КОМАРОВСКИЙ, канд. техн. наук А.Г. КУЛЬБЕЙ,
А.Н. ВОРОНИН, А.Н. ЯНУШОНОК
(Полоцкий государственный университет)**

Рассматривается вопрос разработки технических нормативных правовых актов в области строительства и ремонта магистральных нефтепроводов. В настоящее время в магистральном трубопроводном транспорте все еще действует ряд нормативно-технической документации старого образца. В условиях постепенного изменения национальной системы технического нормирования и стандартизации, появления технических нормативных правовых актов иных статусов возникает необходимость пересмотра данных документов. Специалистами кафедры трубопроводного транспорта УО «ПГУ» совместно со специалистами других организаций республики ведется переработка ряда нормативно-технической документации старого образца. Показаны особенности этого процесса. Представленный в данной работе опыт в последующем можно применить для разработки других технических нормативных правовых актов.

Введение. Республика Беларусь имеет развитую сеть магистральных трубопроводов. Трубопроводная сеть включает как линейную часть, так и объекты хранения и распределения углеводородного сырья и продуктов. Одним из важнейших направлений государственной политики является модернизация основных производственных фондов энергосистемы Беларуси, в том числе модернизация магистральных трубопроводов. Важным условием успешной работы в этом направлении является современная нормативная база, регламентирующая проектирование, сооружение и эксплуатацию объектов трубопроводного транспорта.

Техническое нормирование и стандартизация в магистральном трубопроводном транспорте представляет собой комплексную многогранную систему, имеющую тесную взаимосвязь с системами из других отраслей деятельности. Это вызвано многочисленным разнообразием объектов магистрального трубопроводного транспорта и процессов, происходящих при их функционировании. Данное обстоятельство обуславливает наличие значительного количества технических нормативных правовых актов (ТНПА) различных видов и статусов в магистральном трубопроводном транспорте. Эти акты имеют различное назначение и в совокупности должны обеспечивать полноту и системность технического нормирования и стандартизации, устойчивость, преемственность и возможность системного развития.

Вместе с тем приходится констатировать факт существенного отставания ТНПА от потребностей современных подходов к решению перечисленных задач. В Республике Беларусь в настоящее время все еще действует ряд нормативно-технической документации старого образца. Основные нормативные документы по проектированию и строительству магистральных трубопроводов были созданы в 80-х годах прошлого столетия (СНиП 2.05.06.85, СНиП III-42-80, ВСН 004-012), а по проектированию и монтажу резервуаров до недавнего времени вообще отсутствовали.

В условиях постепенного изменения национальной системы технического нормирования и стандартизации и появления технических нормативных правовых актов иных статусов возникает необходимость пересмотра данных документов, идентификации документов, исторически доказавших свою значимость, и их адаптации к новому правовому статусу с учетом современного достижения науки и техники.

Новое законодательство Республики Беларусь о техническом регулировании нормативной базы сделало большой шаг по пути гармонизации с международной практикой. Цели, основные принципы, положения по государственному регулированию и управлению в области технического нормирования и стандартизации установлены Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации» [1].

Так, в настоящее время ведется работа по разработке и введению в действие на территории Республики Беларусь норм и стандартов Европейского союза в области проектирования и строительства. Наиболее заметные успехи по совершенствованию ТНПА получены в областях архитектуры и гражданского строительства.

В области магистральных трубопроводов только в последние годы активизировалась аналогичная работа. В целях исполнения требований Закона Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации» от 05.01.2004 № 262-3 приказом Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 30.11.2006 № 207 был создан Технический комитет (ТК17) «Магистральный трубопроводный транспорт нефти, газа и нефтепродуктов», сформированный из специалистов, являющихся полномочными представителями заинтересованных объектов технического нормирования и стандартизации – членов ТК, для проведения работ по государственной, межгосударственной и международной стандартизации по закрепленным за ним объектам стандартизации.

Цель деятельности ТК – разработка ТНПА для повышения качества и безопасности магистральных трубопроводов нефти, газа и нефтепродуктов на стадиях их разработки, производства и эксплуатации.

Задачами ТК «Магистральный трубопроводный транспорт нефти, газа и нефтепродуктов» являются:

- рассмотрение и выработка предложений, направленных на проведение в республике единой технической политики в области технического нормирования и стандартизации магистрального трубопроводного транспорта;
- разработка и реализация концепции систем ТНПА в области магистрального трубопроводного транспорта республики;
- разработка и пересмотр государственных стандартов Республики Беларусь и других ТНПА в области магистрального трубопроводного транспорта;
- проведение работ по межгосударственной (региональной) и международной стандартизации в области магистрального трубопроводного транспорта.

Технический комитет может осуществлять взаимодействие непосредственно с техническими комитетами республики. В Республике Беларусь действует 24 национальных технических комитета по стандартизации и 12 национальных технических комитетов в области архитектуры и строительства. Наиболее полноценно ТК17 может сотрудничать с 3 комитетами из смежных областей деятельности:

- ТК 5 «Сварка и родственные процессы»;
- ТК 10 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»;
- ТК 9 «Металлические и деревянные конструкции».

Через Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС) Содружества Независимых Государств ТК17 может осуществлять сотрудничество с межгосударственными техническими комитетами по стандартизации (МТК).

Методическое руководство работой ТК и координацию его деятельности осуществляет Госстандарт (отдел по стандартизации). Секретариат ТК17 расположен на базе Полоцкого государственного университета. Специалистами кафедры трубопроводного транспорта УО «ПГУ» и ОАО «Нефтезавод-монтаж» (г. Новополоцк) в 2008 году был совместно разработан технический кодекс установившейся практики (ТКП) «Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. Правила проектирования и устройства» [2]. Задачей ТКП явилась разработка единого комплекса основных требований по проектированию и изготовлению стальных резервуаров, обеспечивающих высокое качество строительства и безопасность их эксплуатации. В настоящее время на кафедре ведутся работы по разработке ТКП «Нормы технологического проектирования. Нефтепроводы магистральные» и переработке Ведомственных строительных норм (ВСН 004-012) для магистральных нефтепроводов.

В определенной мере не соответствуют современному уровню строительной индустрии и также требуют переработки и дополнения СНиП 2.05.06.85 «Магистральные трубопроводы» и СНиП III-42-80 «Магистральные трубопроводы. Правила производства и приемки работ». Данные документы необходимо *актуализировать* в соответствии с техническими нормативными правовыми актами, действующими на территории Республики Беларусь, ввести аббревиатуру, применяемую в Республике Беларусь; *исключить* разделы по прокладке трубопроводов в районах и на территориях, не присущих Республике Беларусь; *расширить и уточнить* разделы по прокладке трубопроводов через водные преграды с учетом новых технологий и требований охраны окружающей среды; *разработать* разделы по ремонту трубопроводов.

Как было отмечено выше, специалистами кафедры трубопроводного транспорта совместно со специалистами ОАО «Гомельтранснефть Дружба» и ОАО «Трест Белпромналадка» перерабатываются ВСН 004-012. Для кафедры это является положительным опытом, некоторые особенности переработки ВСН представлены в данной статье.

Основная часть

Технический кодекс установившейся практики «Строительство магистральных нефтепроводов. Противокоррозионная защита и теплоизоляция». Со времени появления норматива ВСН 008-88 произошли коренные изменения в обеспечении пассивной защиты объектов трубопроводного транспорта. Выявились не только устаревание рекомендуемых в ВСН 008-88 материалов защиты поверхности от коррозии и появление новых материалов с новыми свойствами, но и изменились подходы к обеспечению качества подготовки поверхности, подходы к технологиям нанесения покрытий, обеспечения сохранности покрытий [3].

История применения защитных покрытий трубопроводов насчитывает более 100 лет, однако до сих пор не все вопросы в этой области успешно решены. С одной стороны, постоянно повышается качество защитных покрытий трубопроводов, практически каждые 10 лет появляются новые изоляционные материалы, новые технологии и оборудование для нанесения покрытий на трубы в заводских и трассовых условиях. С другой стороны, становятся все более жесткими требования к качеству покрытий, которые запрашиваются условиями обеспечения надежности и безопасности работы трубопроводных систем. Изменяются и условия строительства трубопроводов (строительство участков трубопроводов методами «наклонно-направленного бурения», «микротоннелирования» и др.) [4].

Несмотря на то, что сегодня ещё используются методы нанесения изоляционных покрытий в трассовых условиях, предпочтение, однако, по праву отдается покрытиям, наносимым в заводских условиях [5].

В ведомственных строительных нормах 008-88 были предусмотрены битумные покрытия, эпоксидные, стеклоэмалевые, цинковые и алюминиевые, а также полимерные ленточные покрытия (полиэтилен, поливинилхлорид, кремний-органика) для подземных трубопроводов и лакокрасочные покрытия для надземных. Однако за прошедший период (почти четверть века) появились следующие их виды [6]:

- полипропиленовые;
- полиэтиленовые не только ленточные новых сортов, но и экструдированные полиэтиленовые покрытия;
- полиуретановые и эпоксидно-полиуретановые;
- силикатно-эмалевые;
- комбинированное ленточно-полиэтиленовое покрытие.

Данные типы покрытий отвечают современным техническим требованиям и обеспечивают долговременную, эффективную защиту трубопроводов от почвенной коррозии. При этом в разных странах отдается предпочтение различным типам заводских покрытий [7]. Например, в США, Англии, Канаде популярны эпоксидные покрытия труб, в Европе, Японии и России предпочтение отдается заводским покрытиям на основе экструдированного полиэтилена.

Разработчики нового стандарта заимствовали самый передовой зарубежный опыт использования защитных покрытий, оставив, однако, возможность применения и старых видов изоляционных покрытий. В данном случае проблема обеспечения надежности эксплуатируемого объекта ложится на плечи проектных и эксплуатационных организаций, которые могут выбрать путь снижения стоимости наносимых покрытий за счет снижения уровня безопасности эксплуатации объекта.

Магистральные нефтепроводы подвергаются сильному коррозионному воздействию по внутренней поверхности труб, тем не менее данная проблема не была рассмотрена в ВСН 008-88. Следовательно, отдельного рассмотрения требовал вопрос о противокоррозионной изоляции внутренней поверхности труб.

Внедрение в Беларуси европейских подходов к подготовке качества поверхности, например ISO 8501 с новой классификацией степени качестваготавливаемой поверхности (Sa, St), потребовало изменить подходы к используемым средствам и методам подготовки поверхности. Новый нормативный документ вызвал необходимость учета таких способов очистки поверхности, как вакуумная очистка, безабразивная гидроочистка (очистка водой низкого давления (LPWC) менее 34 МПа; очистка водой высокого давления (HPWC) от 34 до 70 МПа; очистка водой сверхвысокого давления (HPWJ) от 70 до 170 МПа; очистка водой ультравысокого давления (UHPWJ) свыше 170 МПа), мокрая струйная очистка (смесью воды и песка), использование новых видов абразивов (например, купершлака).

Вводимый в ближайшем будущем новый ТКП по изоляционным покрытиям учитывает как вышеприведенные особенности, так и ряд других. Этот документ обеспечит новый уровень надежной и безопасной эксплуатации рассматриваемых объектов трубопроводного транспорта.

Технический кодекс установившейся практики «Строительство магистральных нефтепроводов. Средства и установка электрохимзащиты». После появления норматива ВСН 009-88 уже в 1991 году вышло Дополнение к ВСН 009-88 касательно электрохимической защиты кожухов трубопроводов на переходах под автомобильными и железными дорогами. Несомненно, эти вопросы должны были войти ещё в основной текст ВСН 009-88. За прошедшее с тех пор время коренных изменений в области активной защиты от коррозии объектов трубопроводного транспорта не произошло [4; 6]. Однако структура технического кодекса установившейся практики потребовала переработки содержательной части ВСН 009-88 в соответствии с действующим ТКП 1.5-2004 «Правила построения, изложения, оформления и содержания технических кодексов установившейся практики и государственных стандартов».

Технический кодекс установившейся практики «Строительство магистральных нефтепроводов. Подводные переходы». Со времени появления ВСН 010-88 «Строительство магистральных трубопроводов. Подводные переходы» появились новые современные способы прокладки подводных переходов: наклонно-направленное бурение и микротоннелирование. Первый способ (наклонно-направленное бурение) нашел широкое применение как в Беларуси, так и за рубежом.

Эти способы ввиду новизны в документе ВСН 010-88 не рассматривались. Кроме того, в Республике Беларусь отсутствуют ТНПА по указанным способам прокладки подводных переходов. Частично данный пробел удалось восполнить за счет введения в разрабатываемый ТКП «Строительство магистральных нефтепроводов. Подводные переходы» разделов по строительству подводных переходов способом наклонно-направленного бурения и микротоннелирования. Кроме этого, данный ТКП разрабатывался с учетом гидроморфологических условий Республики Беларусь.

Потребовала переработки и структура ТКП, что было обусловлено не только требованиями к изложению документа, но и для удобства восприятия информации, заложенной в ТКП. В начале ТКП дается перечисление способов прокладки подводных переходов, а затем описание этих способов. С появлением новых требований охраны окружающей среды и охраны труда эти разделы в ТКП были полностью переработаны.

Технический кодекс установившейся практики «Строительство магистральных нефтепроводов. Контроль качества и приемки работ». Прежний документ ВСН 012-88 состоял из двух частей, однако, учитывая пожелания заказчика, новый ТКП состоит из одной части и приложений. В новом документе были введены разделы по контролю качества подводных переходов, переходов через дороги, это позволит использовать только один документ (ТКП «Контроль качества и приемки работ») для контроля качества работ, что является положительным фактором. Значительные изменения внесены и в раздел по контролю качества сварных соединений и квалификации персонала. При контроле качества сварных соединений в настоящее время используются современное оборудование, материалы и технологии. Эти прогрессивные подходы были использованы при переработке ВСН012.

ЛИТЕРАТУРА

1. О техническом нормировании и стандартизации: Закон Респ. Беларусь от 5 янв. 2004 г. № 262-3.
2. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. Правила проектирования и устройства: ТКП 45-5.04-172-2010.
3. Низьев, С.Г. О новых Технических требованиях для наружных антикоррозионных покрытий магистральных нефтепроводов / С.Г. Низьев // Коррозия территории нефтегаз. – 2003. – № 11. – С. 8 – 14.
4. Трубопроводный транспорт нефти: учебник для вузов / С.М. Вайншток [и др.]; под ред. С.М. Вайнштока. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т. 2. – 621 с.
5. Притула, В.В. Проблемы эксплуатации трубопроводов / В.В. Притула // Коррозия территории нефтегаз. – 2006. – № 2(4). – С. 56 – 59.
6. Теплинский, Ю.А. Коррозионная повреждаемость подземных трубопроводов / Ю.А. Теплинский, Н.И. Мамаев. – СПб.: ООО «Инфо-да», 2006. – 406 с.
7. Гольдфарб, А.Я. Специфические российские проблемы в области защитных покрытий трубопроводов / А.Я. Гольдфарб // Коррозия территории нефтегаз. – 2007. – № 2(7). – С. 14 – 19.

Поступила 19.01.2012

TECHNICAL REGULATION OF BUILDING AND REPAIRING OF MAIN PIPELINES

**V. LIPSKY, L. SPIRIDYONOK, D. KOMAROVSKY,
A. KULBEY, A. VORONIN, A. YANUSHONOK**

This article is devoted to development of technical normative law acts in the area of building and repairing of main pipelines. At present a set of obsolete normative technical documents is still valid in main pipeline transport. In the conditions of gradual change of the national system of technical normalization and standardization and appearance of technical normative law acts of different statuses arises the necessity of reviewing them. Specialists of the Department of pipeline transport of Polotsk State University jointly with specialists of other organizations carry out reviewing of a set of obsolete normative technical documents. The features of reviewing are presented in this article. The given experience can be applied for reviewing of other technical normative law acts in future.

УДК 006.05:621.643

**ОБ АКТУАЛЬНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЗАПИСКИ
В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ
ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ**

**А.Н. ВОРОНИН, д-р техн. наук, проф. В.К. ЛИПСКИЙ,
(Полоцкий государственный университет);
д-р техн. наук, проф. П.С. СЕРЕНКОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)**

Показана необходимость разработки Системы технических нормативных правовых актов в магистральном трубопроводном транспорте Республики Беларусь. Рассматриваются системы взглядов, представляющие основные направления развития в области стандартизации на государственном и локальном уровнях в различных странах, в том числе и в Республике Беларусь. Приведены задачи разработки и содержание Системы технических нормативных правовых актов. Обсуждаемая Система должна способствовать повышению качества и конкурентоспособности услуги, предоставляемой магистральным трубопроводным транспортом за счет повышения уровня компетенции специалистов в магистральном трубопроводном транспорте после её изучения.

Введение. Ведение любого вида деятельности в современных условиях интеграционных процессов экономических сред различных стран диктует необходимость постоянного реагирования, адаптации и изменения системы технического нормирования и стандартизации.

Одним из условий улучшения системы технического нормирования и стандартизации в магистральном трубопроводном транспорте является создание Системы технических нормативных правовых актов в магистральном трубопроводном транспорте.

В соответствии со статьей 1 Закона Республики Беларусь «О магистральном трубопроводном транспорте» [1] магистральный трубопроводный транспорт – вид транспорта, предназначенный для транспортировки магистральными трубопроводами продукции, подготовленной в соответствии с требованиями технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации, от пункта приемки продукции до пункта ее сдачи, передачи в другие трубопроводы, на иной вид транспорта или хранение.

Согласно общегосударственному классификатору видов экономической деятельности Республики Беларусь ОКРБ 005-2006 деятельность магистрального трубопроводного транспорта относится к секции I «Транспорт и связь» раздела 60 «Деятельность сухопутного транспорта» группы 603 «Транспортирование по трубопроводам» класса 6030 «Транспортирование по трубопроводам» подкласса 60300 «Транспортирование по трубопроводам» Этот подкласс включает: *транспортировку* газов, жидкостей, жидких растворов и других материалов по трубопроводам; *услуги* насосных станций и *техническое обслуживание* трубопроводов (распределение природного или генераторного газа, воды или пара). Оказываемая услуга магистральным трубопроводным транспортом осуществляется при участии процессов и вовлекаемых в них объектов. При предоставлении услуги транспортировки жидких и газообразных энергоносителей магистральным трубопроводным транспортом объекты участвуют в планировании, проектировании, строительстве, реконструкции, вводе в эксплуатацию, эксплуатации, консервации, выводе из эксплуатации и ликвидации.

Для магистрального трубопроводного транспорта характерно большое разнообразие объектов и процессов, происходящих при их функционировании. Данное обстоятельство обуславливает наличие значительного количества технических нормативных правовых актов различных видов и статусов в магистральном трубопроводном транспорте. Специалисту в магистральном трубопроводном транспорте по причине его узкой специализации иногда затруднительно понимать данные акты, а также обладать знаниями по иным аспектам системы технического нормирования и стандартизации; иногда имеет место отсутствие информации о существовании некоторых из них.

Основная часть. Система взглядов по основным направлениям развития в области стандартизации на государственном и локальном уровнях, направленная на обеспечение комплексного решения задач функционирования системы стандартизации, представлена в различных странах в виде нормативных документов. В Соединенных Штатах Америки Национальным институтом стандартов в 2000 году разработан документ «Стратегия стандартов Соединенных Штатов» [2], который периодически пересматривается. Последняя редакция данной Стратегии (от 02.12.2010) содержит принципы системы стандартизации,

методы достижения поставленных целей в международном и национальном контексте, требования к разработчикам стандартов, государственным органам, предприятиям и потребителям с целью постоянного улучшения системы стандартизации.

В Европейском Союзе Комитетом стандартов разработана «Стратегия Европейского комитета по стандартизации на 2011 – 2013 годы» [3], описывающая политические, экономические, экологические, общественные и технологические причины необходимости дальнейшего развития системы стандартизации. В данной Стратегии приводятся задачи, стоящие перед системой стандартизации, рекомендации, выполнение которых поможет решить поставленные задачи, и ожидаемые результаты.

В Российской Федерации подобная система взглядов на проблемы развития системы стандартизации до 2010 года в рамках государственного масштаба представлена в Концепции национальной стандартизации [4], разработанная в 2006 году. Данный документ содержит обоснованные цели, задачи и направления развития системы стандартизации.

В целях определения приоритетных направлений в системе технического регулирования отраслей и сфер деятельности в Российской Федерации в 2006 году были созданы Методические рекомендации по разработке систем технического регулирования в отраслях и сферах деятельности [5]. Действие данных Рекомендаций привело к появлению ряда концепций системы технического регулирования в отраслях и сферах деятельности. Существуют концепции системы технического регулирования на железнодорожном транспорте, в системе Росземкадастра, в авиационной промышленности, в сфере информационных технологий, в металлургии, в нефтегазовой отрасли. Данные концепции преимущественно были разработаны в 2006 году.

Концепция технического регулирования в нефтегазовой отрасли Российской Федерации [6] разработана на высоком профессиональном уровне и представляет собой грамотно составленный документ. В качестве наиболее важных пунктов в данной Концепции содержатся принципы, особенности и структура технического регулирования в нефтегазовой отрасли, взаимосвязь с другими системами технического регулирования, оценка и подтверждение соответствия в нефтегазовой отрасли, административные вопросы и сопровождение системы технического регулирования в нефтегазовой отрасли.

Данные системы технического регулирования могут также разрабатываться отдельным предприятием либо по заказу отдельного предприятия для собственных потребностей. Такой системой является *Концепция технического регулирования в ОАО «Газпром»* от 2009 года [7].

В Республике Беларусь также разработаны документы, отражающие основные направления развития стандартизации. В предыдущие годы в Беларуси действовала Концепция государственной системы технического нормирования и стандартизации в строительстве, одобренной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 2 февраля 1993 года № 426 [8]. В настоящее время на территории республики взамен данной Концепции действует ТКП 45-1.01-4-2005 «Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства. Основные положения» [9].

Настоящий технический кодекс установившейся практики определяет цели, принципы построения и общую структуру Национального комплекса технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации в строительстве, в которую в блок 3.05 входят магистральные и промысловые трубопроводы. В данном документе установлены объекты технического нормирования и стандартизации в строительстве, виды технических нормативных правовых актов, требования к их содержанию, а также ответственность за разработку этих актов и контроль за их соблюдением.

Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь для определения основных направлений государственной политики в области стандартизации и с целью усиления влияния стандартизации на реформирование экономики республики, повышение качества и конкурентоспособности продукции и услуг была разработана *Концепция развития стандартизации в Республике Беларусь* от 12.01.2001 на период до 2005 года [10]. В концепции определены цели, принципы и приоритетные направления государственной стандартизации, стратегия ее развития, категории и виды нормативных документов, уровни стандартизации, методы и практика стандартизации, структура органов и служб стандартизации, механизм реализации. В установленный Концепцией период в пункте 7.1 «Приоритетные направления стандартизации» предлагалось определить направления стандартизации в ведущих отраслях, в том числе в топливно-энергетическом комплексе, химической и нефтехимической промышленности и услугах.

В магистральном трубопроводном транспорте, предоставляющем услугу транспортирования энергоносителей в рамках деятельности топливно-энергетического комплекса и нефтехимической промышленности, на сегодняшний день отсутствует документированная система взглядов (Система, Концепция, Стратегия), в которой были бы изложены приоритетные направления стандартизации, что создает необходимость разработки подобной документированной системы.

Задачами, для решения которых данная Система будет разработана, являются:

- исследование структуры системы технических нормативных правовых актов с учетом отраслевых особенностей;
- анализ обеспеченности техническими нормативными правовыми актами в области магистрального трубопроводного транспорта;
- выработка рекомендаций по совершенствованию комплекса технических нормативных правовых актов в магистральном трубопроводном транспорте.

Формирование существующего перечня технических нормативных правовых актов, отраженного в Системе, позволит увидеть обеспеченность магистрального трубопроводного транспорта актами и обратить внимание на объекты и процессы, которые нуждаются в обеспечении актами.

Деятельность по дальнейшему качественному обновлению и совершенствованию системы технического нормирования и стандартизации в магистральном трубопроводном транспорте, осуществляемая на основе Системы, может включать следующие основные этапы:

- анализ современного состояния в области разработки и обеспеченности техническими нормативными правовыми актами в магистральном трубопроводном транспорте, выявление основных проблем и противоречий;
- определение первоочередных, основополагающих, перспективных направлений совершенствования технических нормативных правовых актов и их реализация.

Заключительная часть. Проведенный анализ системы технического нормирования и стандартизации в магистральном трубопроводном транспорте показал, что существует необходимость в систематизации технических нормативных правовых актов, что может быть осуществлено в Системе технических нормативных правовых актов в магистральном трубопроводном транспорте. Данная процедура предполагает деятельность по упорядочению технических нормативных правовых актов, приведению их в единую внутренне согласованную систему.

Обеспечить единое комплексное решение при систематизации технических нормативных правовых актов возможно благодаря системному подходу, который позволит учесть всевозможные классификационные признаки объектов магистрального трубопроводного транспорта. Применение системного подхода не случайно и имеет рациональное подтверждение. Причина кроется в том, что магистральный трубопроводный транспорт является не просто совокупностью обособленных объектов, а представляет собой единую систему объектов, находящихся во взаимозависимости и взаимовлиянии. Использование понятия «система» несет в себе целевую нагрузку и является закономерным, так как все характерные свойства «системы» присущи и совокупности производственных объектов трубопроводного транспорта.

При систематизации технических нормативных правовых актов необходимо произвести классификацию объектов магистрального трубопроводного транспорта с целью сопоставления классификационными признаками кода, присвоенного различным видам технических актов.

Содержанием классификации является не только распределение изучаемых объектов по разным группам, но и определенный порядок этих групп, объединяющих их в единую систему.

Система должна решать две *основные задачи*:

1) представлять в надежном и удобном для обозрения и распознавания виде все объекты этой предметной области;

2) содержать как можно больше существенной информации о них.

Рассмотренная литература позволила нам *классифицировать объекты по следующим признакам*:

- 1) виду транспортируемого продукта: нефть, газ, нефтепродукты;
- 2) этапам жизненного цикла: планирование, проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию, эксплуатация, реконструкция, консервация, вывод из эксплуатации, ликвидация;
- 3) типу размещения: площадочные, линейные.

Для простоты и лаконичности представления системы объектов магистрального трубопроводного транспорта первую классификацию следует проводить по виду транспортируемого продукта, вторую – по типу размещения производственных объектов, третью – по этапам жизненного цикла, что более практично по сравнению с другими классификациями по вышеуказанным признакам.

В настоящее время в Республике Беларусь разработано и введено в действие 17 технических регламентов в различных отраслях экономики, но в магистральном трубопроводном транспорте такой единый системообразующий документ пока отсутствует. Разработка и принятие технического регламента в магистральном трубопроводном транспорте позволит сконцентрировать в едином документе требования по безопасности, сформировавшихся исходя из научных данных или технически обоснованных критериев на базе установившейся практики, которые в настоящее время установлены в различных документах, в том числе принятых различными органами государственного управления.

Заключение. Рассматриваемая нами Система должна содержать информацию: о состоянии технического нормирования и стандартизации в магистральном трубопроводном транспорте; технических

нормативных правовых актов; системе смежных технических нормативных правовых актов в магистральном трубопроводном транспорте; информационно-поисковых системах, в которых можно осуществить поиск текста необходимых актов, координации работ в системе технического нормирования и стандартизации в магистральном трубопроводном транспорте и иных аспектах технического нормирования и стандартизации в магистральном трубопроводном транспорте.

Система должна способствовать повышению качества и конкурентоспособности услуги, предоставляемой магистральным трубопроводным транспортом. Это возможно за счет повышения уровня компетенции специалистов в магистральном трубопроводном транспорте после ознакомления с Системой и формулирования последующих возможных рекомендаций по совершенствованию системы технического нормирования и стандартизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. О магистральном трубопроводном транспорте: Закон Респ. Беларусь от 09 янв. 2002 г., № 87-3.
1. United States Standards Strategy [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: http://ansi.org/standards_activities/nss/usss.aspx?menuid=3. – Дата доступа: 15.07.2011.
2. CEN Strategy [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.cen.eu/cen/AboutUs/Strategy/Pages/default.aspx>. – Дата доступа: 20.07.2011.
3. Концепция национальной стандартизации [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: <http://www.gost.ru>. – Дата доступа: 25.07.2011.
4. Методические рекомендации по разработке систем технического регулирования в отраслях и сферах деятельности [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: <http://www.gost.ru>. – Дата доступа: 30.07.2011.
5. Концепция технического регулирования в нефтегазовой отрасли Российской Федерации [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.gost.ru>. – Дата доступа: 20.08.2011.
6. Концепция технического регулирования в ОАО «Газпром» [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://www.gazprom.ru>. – Дата доступа: 30.08.2011.
7. Концепция государственной системы технического нормирования и стандартизации в строительстве, одобрена постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 2 февр. 1993 г. № 426 [Электронный ресурс]. – 1993. – Режим доступа: <http://www.pravo.by>. – Дата доступа: 05.09.2011.
8. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства. Основные положения: ТКП 45-1.01-4-2005. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2005. – 45 с.
9. Концепция развития стандартизации в Республике Беларусь от 12.01.2001 на период до 2005 года: одобрена решением научно-технической комиссии по стандартизации Госстандарта (протокол № 1 от 12.01.2001) [Электронный ресурс]. – 2001. – Режим доступа: <http://www.pravo.by>. – Дата доступа: 05.09.2011.

Поступила 18.05.2012

ON THE ACTUALITY OF THE INFORMATIVE-ANALYTIC SHEET IN MAJOR PIPELINE TRANSPORT UNDER TECHNICAL REGULATION

A. VARONIN, V. LIPSKY, P. SERENKOV

This article is devoted to the necessity of development of System of technical normative legal acts in the mail pipeline transport. There were presented different points of views which are considering directions in standardization in different countries including the Republic of Belarus on local and governmental levels. There were given tasks and content of System of technical normative legal acts. Under discussion System must assist to rise in quality and competitiveness of service which is accomplished by the main pipeline transport at the expense of rise in specialists competency after getting acquainted.

УДК 658.26:666.982

**ФОРМИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ПРЕДПРИЯТИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИХ МОДЕРНИЗАЦИИ****А.М. НИЯКОВСКИЙ***(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрены вопросы потребления тепловой и электрической энергии в теплоэнергетических системах промышленных предприятий, осуществляющих производство сборного железобетона. Проанализирована структура энергопотребления. Показано влияние на объёмы и структуру потребления энергии химических добавок – ускорителей твердения, а также различных технологических приёмов при осуществлении тепловой обработки бетонов. Предложена оценка изменения структуры и объёмов удельного потребления тепловой и электрической энергии при производстве сборного железобетона. Представлена обобщённая структурная схема теплоэнергетической системы предприятий железобетонных изделий и сформулированы основные принципы её совершенствования в условиях модернизации производства и технологии с целью оптимизации энергопотребления таких предприятий и снижения затрат первичной энергии на их энергообеспечение.

Введение. Производство железобетонных изделий (ЖБИ) в Республике Беларусь и в большинстве государств бывшего СССР сопряжено со значительным расходом топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Удельный вес затрат, связанных с приобретением ТЭР, составляет в себестоимости продукции предприятий, выпускающих сборный железобетон, от 7 до 12 %. На протяжении достаточно долгого времени ведутся научные исследования и осуществляются практические мероприятия, направленные на снижение энергопотребления при производстве ЖБИ [3; 4; 8; 11; 12]. Однако все они посвящены решению локальных задач, связанных с предотвращением необоснованных потерь энергии при осуществлении производственных процессов, совершенствованию отдельных технологических операций и режимов их осуществления. В частности, предлагается изменять параметры и условия обработки ЖБИ, состав и качество исходных компонентов, используемых для изготовления бетонных смесей. При этом за рамками рассмотрения остаются возникающие системные эффекты и влияния, обусловленные реализацией таких предложений. На ряде предприятий, в частности ОАО «Новополоцкжелезобетон», для энергообеспечения планируется внедрить собственные мини-ТЭЦ. При этом остаётся открытым вопрос расчёта оптимальных величин электрической и тепловой мощности таких источников. Их значение определяется исходя из сложившейся энергоёмкости тех или иных производственных процессов, без учёта современных, в первую очередь зарубежных тенденций, свидетельствующих о наличии предпосылок к существенному изменению структуры и объёмов энергопотребления при производстве ЖБИ. Всё это свидетельствует о необходимости проведения научно-исследовательских работ, призванных обеспечить системный подход к рассматриваемой проблеме.

Структура и объёмы потребления ТЭР в значительной степени зависят от номенклатуры выпускаемой продукции, типов основного технологического оборудования, видов и составов бетонных смесей.

Основными потребляемыми при производстве ЖБИ видами энергии являются электрическая (ЭЭ) и тепловая (ТЭ). Электрическая энергия в основном расходуется на силовой привод машин и механизмов, используемых в технологии производства ЖБИ, пневмотранспорт и вентиляцию, электросварку, для обеспечения автоматического контроля и управления, на освещение и пр. В значительно меньшем объёме, чем ранее, ЭЭ применяется сейчас для тепловлажностной обработки (ТВО) бетонов и бетонных смесей. Для ТВО железобетонных изделий в больших объёмах потребляется ТЭ, которая также расходуется на разогрев инертных заполнителей (песка, щебня, прочих сыпучих материалов), бетонных растворов при их приготовлении, а также на коммунально-бытовые нужды производства (отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение). При этом технологическое потребление энергии является преобладающим для предприятий, производящих ЖБИ. Перечисленные выше направления энергопотребления условно могут быть отнесены к так называемым «прямым» затратам энергии. Помимо них энергоёмкость ЖБИ как подотрасли производства строительных материалов определяется и «косвенными» затратами энергии: на выпуск цемента и вяжущих, заполнителей, активных добавок, арматуры.

Удельное, в расчёте на единицу выпуска ЖБИ, потребление ТЭР на ТВО зависит от технологических, климатических и производственно-экономических факторов, уровня автоматизации процессов. Согласно данным отдела строительной науки и нормативов Министерства архитектуры и строительства [1] в Республике Беларусь в среднем на 1 м³ сборного железобетона при ТВО в ямных пропарочных камерах (в которых выпускается около 75 % изделий) расходуется около 1,5 ГДж теплоты, или около 50 кг условного топлива. Здесь же отмечается, что при должной степени автоматизации процессов ТВО и повышении эффективности тепловой изоляции камер этот показатель может быть снижен до 0,35 – 0,40 ГДж/м³ или 12 – 13 кг

условного топлива. В Российской Федерации среднее потребление ТЭР на ТВО оценивается в 70 кг условного топлива на 1 м³ изделия [3], в то время как теоретически обоснованный расход составляет для типовых ямных камер согласно [4] около 0,5 ГДж, или порядка 14 – 15 кг условного топлива на 1 м³ бетона.

При использовании ЭЭ на тепловую обработку бетона (электроразогрев, индукционный нагрев, конвективный и инфракрасный прогрев) расходуется на 1 м³ бетона от 60 до 200 кВт·ч ЭЭ [5]. С учётом эффективности генерации ЭЭ на источнике (КЭС) и её транспортировки это составляет от 20 до 71 кг условного топлива на 1 м³ обрабатываемого бетонного изделия. В настоящее время ЭЭ практически не используется для тепловой обработки ЖБИ на существующих предприятиях отрасли по экономическим и энергетическим соображениям.

На рисунке 1 показана структура «прямых» затрат энергии на выпуск ЖБИ, полученная путём анализа опубликованных обобщённых данных [1; 2].

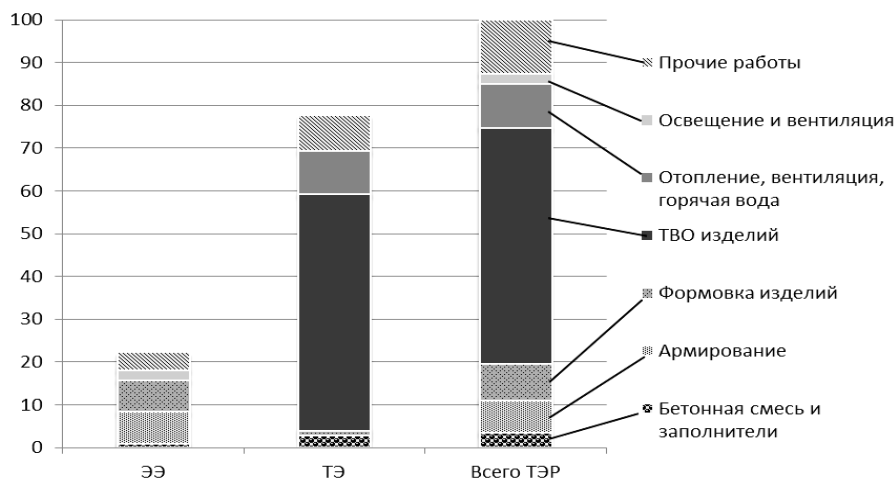


Рис. 1. Структура «прямых» затрат ТЭР на производство ЖБИ

Необходимо отметить, что энергоёмкость производства ЖБИ в Европе, США, Японии и других странах существенно ниже, чем приведённые выше показатели удельного потребления ТЭР. Эти различия в значительной мере обусловлены недостаточным технологическим и техническим уровнем существующих предприятий ЖБИ, построенных в период низких цен на первичные энергетические ресурсы в СССР, поэтому ныне действующие заводы ЖБИ подлежат модернизации путём внедрения новых и улучшенных технологий приготовления бетонных растворов, формовки изделий и их тепловлажностной обработки.

Основной резерв сокращения потребления ТЭР при производстве ЖБИ состоит в уменьшении расходов энергии на ТВО, что достигается в результате реализации комплекса различных организационных и технологических приёмов (в зависимости от номенклатуры выпускаемых изделий, технической оснащённости предприятий и экономических возможностей) [8]: применения химических добавок – ускорителей твердения (ХД), предварительного паро- или электроразогрева бетонных смесей, снижения величины отпускной прочности бетона (в тёплое время года), в том числе и с последующим выдерживанием на воздухе, применения двухстадийной ТВО, внедрением способов обработки в малонапорных пропарочных камерах (в среде с регулируемой влажностью или в среде продуктов сгорания топлива), в электроиндукционных и инфракрасных камерах (при должном технологическом обосновании), а также при комплексном сочетании тех или иных приёмов и способов.

Большой интерес в связи с энергосбережением в настоящее время представляет собой использование ХД. Эффективность их применения подтверждена сложившейся практикой и научными исследованиями, результаты которых в качестве примера представлены в таблицах 1 и 2 [3].

Таблица 1

Прочность бетонов с комплексными добавками через сутки нормального твердения

Добавка	Класс бетона по прочности						
	B7,5	B10	B15	B25	B30	B35	B40
ТСМ + СН	95/118*	93/110	95/115	92/108	95/100	90/105	95/95
Хидетал-П-5	70/83	72/85	68/80	65/80	63/75	66/70	64/70
С-3 + ННХК	62/71	62/75	59/70	60/69	58/71	57/73	59/72
Без добавок	30/43	32/40	35/44	31/45	36/44	30/41	31/42

* – здесь и далее в таблице перед чертой прочность бетона в % от класса через 24 ч, за чертой – через 36 ч.

Таблица 2

Прочность бетона с добавкой ТСМ + СН через сутки естественного твердения
при температуре бетонной смеси 10 – 16 °С

Формуемость		Класс бетона						
Ж, с	ОК, см	B7,5	B10	B15	B25	B30	B35	B40
> 80		100/70*	95/65	95/60	90/55	85/50	80/50	75/50
40 – 80		100/65	95/55	90/55	85/50	80/45	70/50	65/50
20 – 40		90/60	75/60	70/50	65/50	60/50	60/50	60/50
5 – 20	0 – 1	65/50	60/50	55/50	55/50	55/50	55/50	55/50
	2 – 4	60/45	55/40	50/40	50/40	50/40	50/40	50/40

* – здесь и далее в таблице перед чертой прочность бетона в % от марки, приготовленного на цементе I группы эффективности, за чертой – II группы.

В таблицах использованы следующие обозначения: «Хидетал-П-5» – (суперпластификатор – ускоритель – ингибитор); «ТСМ + СН» – (пластификатор – ускоритель – ингибитор); «С-3 + ННХК» – (суперпластификатор – ускоритель); СН – сульфат натрия; ННХК – нитрит-нитрат хлорид кальция; ТСМ – термопластическая смола модифицированная; Ж и ОК – соответственно жёсткость и осадки конуса бетонной смеси [3].

Таким образом, например, комплексная добавка ТСМ + СН (и другие, аналогичные ХД) позволяет при температуре +10 °С и выше отказаться от тепловой обработки бетона и, следовательно, снизить годовые затраты ТЭР за счёт тёплого периода года, а благодаря сокращению времени ТВО уменьшить потребляемую мощность источников энергоснабжения.

Во многом благодаря массовому применению ХД в промышленно развитых странах удалось снизить расходы ТЭР на выпуск ЖБИ. Широкому их использованию в Республике Беларусь и ряде постсоветских стран препятствует высокая стоимость таких добавок, сопоставимая со стоимостью сэкономленных энергоресурсов, однако этот ценовой фактор теряет своё решающее значение при оптимизации производства бетонов по мере роста тарифов на ТЭР.

В результате неизбежного совершенствования технологии производства ЖБИ подвергнутся радикальным изменениям объёмы и структура энергопотребления соответствующих предприятий отрасли, поэтому следует ожидать значительного, в 2 и более раз, снижения потребления ТЭ при неизменном или несколько возрастающем потреблении ЭЭ. Последнее обстоятельство обусловлено ростом энерговооружённости производства, повышением уровня механизации, а также возможным увеличением доли ЭЭ, направляемой на тепловую подготовку бетонных смесей и ТВО изделий в современных технологиях производства ЖБИ. Отмеченные тенденции проиллюстрированы на рисунке 2.

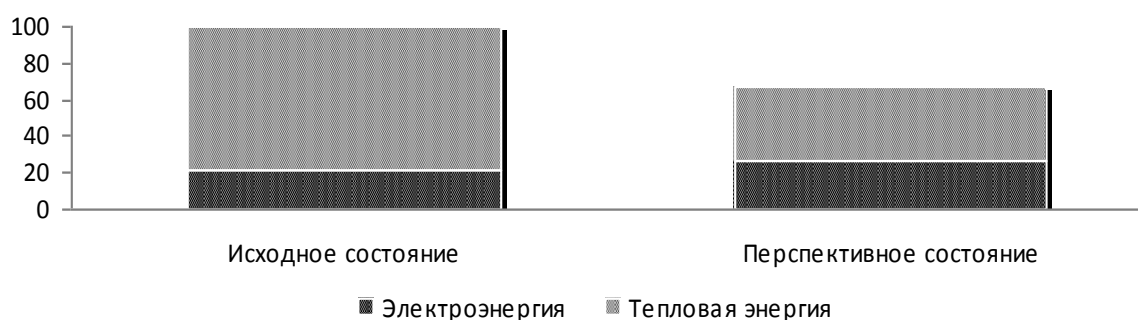


Рис. 2. Изменение объёмов и структуры потребления ТЭР в процентах от исходных величин (прогноз)

Изменение объёмов и структуры энергопотребления в свою очередь неизбежно потребует реформирования теплоэнергетических систем промышленных предприятий (ТЭСПП), производящих ЖБИ. При этом рациональной будет считаться ТЭСПП, сформированная на основе системного подхода, для которой определены параметры и режимы работы энергетических установок с учётом связей с внешними источниками и/или потребителями ТЭР в условиях взаимного единства всех элементов [6; 9].

Структурная схема ТЭСПП производства ЖБИ. Основными компонентами производства ЖБИ служат: цемент, другие вяжущие (известь, шлаки, золы уноса и т.п.), инертные заполнители (песок, щебень, песчано-гравийная смесь, керамзит, аглопорит, перлит), химические добавки, вода, стальные элементы армирования. Их производство также сопряжено с затратами ТЭР, которые в выбранном контексте называют «косвенными». В частности [1; 7], для производства одной тонны цемента расходуется, в зависимости от его вида и технологии выработки, от 150 до 305 кг условного топлива. Для производства одной тонны стальной арматуры (прута, проволоки, канатов) – от 1930 до 2150 кг условного топлива, выработка одной тонны керамзита, перлита и аглопорита требует от 44 до 113 кг условного топлива.

С учётом сказанного в обобщённом виде структура ТЭСПП ЖБИ может быть представлена схемой, изображённой на рисунке 3.

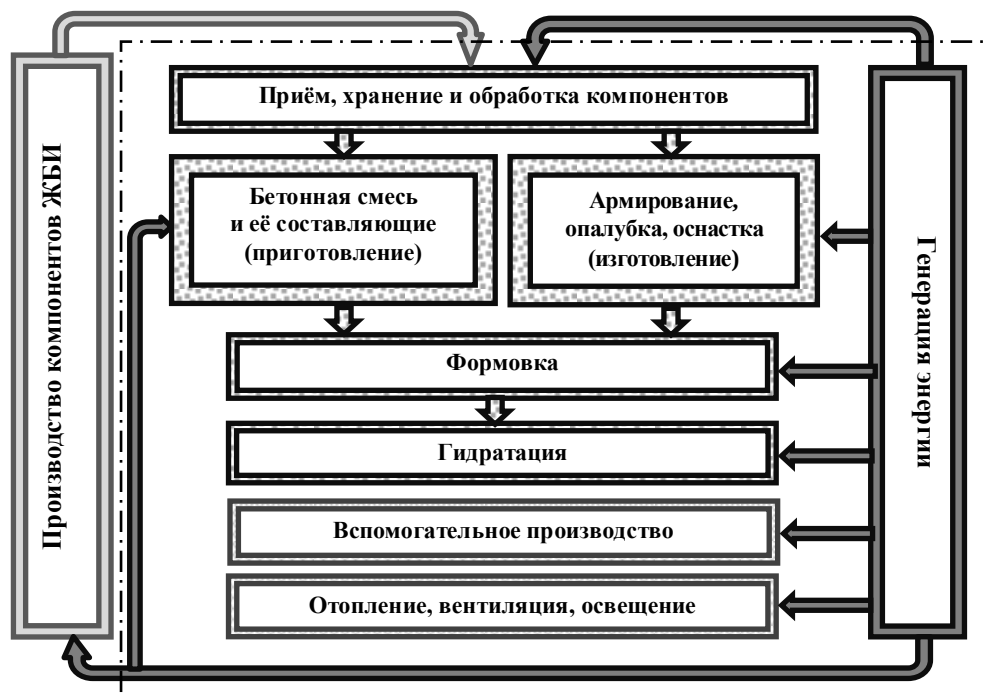


Рис. 3. Структурная схема ТЭСПП ЖБИ (обобщённый вид)

В системе Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь более 90 % прямых обобщённых затрат ТЭР приходится на предприятия промышленности строительных материалов (в том числе на выпуск отдельных компонентов ЖБИ). На долю предприятий, непосредственно производящих ЖБИ, приходится около 0,8 % отраслевого энергопотребления. В целом же потребление ТЭР в строительном комплексе страны к 2006 году достигло 1751 тыс. т. у. т. или 6,2 % энергопотребления Республики Беларусь [7].

Таким образом, с позиции анализа расхода первичной энергии энергоёмкость производства основных компонентов ЖБИ (с учётом их доли в готовых бетонных изделиях) превышает затраты ТЭР на выработку самих этих изделий, но не влияет существенным образом на потребление ТЭР в процессе изготовления ЖБИ. Нахождение путей экономии указанных компонентов при сохранении качества ЖБИ представляет собой самостоятельную задачу, решение которой находится за рамками построения ТЭСПП рассматриваемого производства. В то же время способ и место генерации ТЭР прямым образом сказывается на энергопотреблении производства ЖБИ. Существующие предприятия, производящие ЖБИ, обеспечиваются ТЭР от различных источников: собственных или сторонних котельных, теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), конденсационных электрических станций (КЭС). В целом при производстве строительных материалов и изделий доля энергоснабжения от собственных источников не превышает [7]: ТЭ – 6,4 %, ЭЭ – 1,59 %. При разработке принципов и методов построения рациональной ТЭСПП представляется важным рассматривать энергетические источники в качестве составного элемента структурной схемы производства ЖБИ (вне зависимости от их принадлежности). При этом следует принимать во внимание, что в ТЭСПП с совершенным энергетическим обеспечением ЭЭ должна вырабатываться по комбинированной технологии на тепловом потреблении соответствующего производственно-технологического процесса [10]. На рисунке 3 элементы, подлежащие включению в формируемую ТЭСПП, очерчены штрихпунктирной линией.

Принципы совершенствования ТЭСПП. Для типичного предприятия, производящего ЖБИ, каким, в частности, является ОАО «Новополоцкжелезобетон» (г. Новополоцк, Республика Беларусь), потребление ТЭ различного потенциала и ЭЭ в условиях сложившейся производственной программы при обеспечении выполнения запланированных прогнозных показателей по росту объёмов выпускаемой продукции представлено в таблице 3.

Энергопотребление существующих предприятий ЖБИ не может быть однозначно систематизировано и стандартизовано в виде типовых графиков, поскольку характер такого потребления находится в прямой зависимости от производственной программы, номенклатуры выпускаемых изделий, уровня технической оснащённости и пр. Даже для двух родственных предприятий названные характеристики могут быть различными. Общие закономерности могут проявиться только при анализе относительно продолжи-

тельных периодов энергопотребления от нескольких месяцев до года. Сравнение характера энергопотребления на предприятиях, производящих ЖБИ, следует в силу названных причин осуществлять в «стандартизованных» условиях, применительно к реализации условной производственной программы.

Таблица 3

Характер потребления электрической и тепловой энергии на предприятии, производящем ЖБИ
(на примере ОАО «Новополоцкжелезобетон»*)

Наименования параметра потребления	Электрическая энергия		Тепловая энергия (от внешних сетей)		
	ед. измерения	от внешних сетей	ед. измерения	в паре ($P = 0,25 \text{ МПа}$; $T = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	в горячей воде (до $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
Годовое потребление	тыс. кВт·ч	4763	ГДж	83590	
Среднесуточное потребление	тыс. кВт·ч	13,049	ГДж	229	
Среднечасовая мощность потребления	МВт	0,544	ГДж/ч	9,55	2,35
*С учётом реализации программы по росту объёмов производства в 2010 – 2016 годы					

Как уже отмечалось, наиболее энергоёмкой технологической операцией при производстве ЖБИ является ТВО, осуществляемая в устройствах (агрегатах) различной конструкции, в которых могут быть реализованы разные физические принципы преобразования и использования энергии. Главное требование к ним – обеспечение требуемых температурных режимов прогрева изделий в среде с необходимой относительной влажностью в течение заданных периодов времени. Критерием эффективности ТВО является получение ЖБИ с допустимой, так называемой «распалубочной», прочностью (как правило, не менее 70 % от значения, определяющего марку бетона) при минимальном времени обработки и обеспечении заданных физико-механических свойств. Параметры процессов ТВО рассчитываются таким образом, чтобы реакция гидратации цемента в бетоне прошла наиболее полно. Поэтому определяющими факторами здесь выступают температура и влажность среды, температура и влажность обрабатываемых изделий, скорость их прогрева и охлаждения. Конкретный же режим ТВО находится в прямой зависимости от вида изделий, их назначения, состава бетонных смесей и способа обработки. В общем случае наиболее распространёнными являются режимы обработки в паровоздушной среде с температурой, как правило, 60 – 90 °С и относительной влажностью, близкой к 100 % при атмосферном или небольшом избыточном давлении [4; 8]. В автоклавах ТВО может проводиться при температурах насыщения, соответствующих давлениям 1,2 – 2,0 МПа [8].

Повышенные требования к тепловым и влажностным режимам обработки ЖБИ в условиях ранее достигнутого уровня технологии и автоматизации производственных процессов, сделали ТВО с использованием насыщенного водяного пара, имеющего температуру от 100 до 200 °С, основным методом обработки бетонов в устройствах ускоренной гидратации. Именно этим обстоятельством обусловлен высокий по сравнению с ЭЭ удельный вес ТЭ в общих затратах ТЭР при производстве ЖБИ. Вместе с тем эффективность генерации ТЭ и ЭЭ на источнике находится в прямой зависимости от соотношения этих видов энергии в балансе потребления ТЭСПП. Наиболее рациональной является ситуация, когда вся потребляемая предприятием ЭЭ производится комбинированно на тепловом потреблении этого же предприятия.

Технология производства ЖБИ предполагает использование различного оборудования, энергоснабжение которого может осуществляться энергоносителями разного вида и потенциала: водой разной температуры, водяным паром, продуктами сгорания органических топлив, ЭЭ. При комбинированной генерации ЭЭ и ТЭ могут быть получены все перечисленные энергоносители. Поэтому при модернизации действующих и проектировании новых производств ЖБИ представляется важным обеспечить соответствие между структурами генерации и потребления энергии, т.е. создать энерготехнологический комплекс, обеспечивающий наиболее рациональную ТЭСПП.

Заключение. В процессе внедрения новых технологических приёмов, модернизации действующих или при создании новых предприятий для производства ЖБИ структуры генерации и потребления энергоресурсов неизбежно изменяется. Диапазон изменения величины потребляемой электрической энергии теоретически ограничен, с одной стороны, расходом ЭЭ на технологические нужды, не связанные с ТВО бетонов, с другой – максимальным потреблением ЭЭ, когда ТВО (предельный случай) осуществляется в электроустановках. Соответственно определится и диапазон изменения величины теплового потребления, которое достигает своего максимума при производстве ТВО в агрегатах, использующих тепловые энергоресурсы. В этом случае нахождение оптимальных по экономическим и энергетическим соотношениям значений потребления тепловой и электрической энергии следует считать важной исследовательской задачей. Также следует принимать во внимание, что тепловое потребление предприятий ЖБИ обеспечивается теплоносителями разного потенциала (влажным паром, водой различных температур), что также должно быть учтено при формировании рациональной ТЭСПП.

Оптимальной следует считать такую структуру ТЭСПП, которая обеспечивает, с одной стороны, минимальную потребность в первичных энергоресурсах, импортируемых для обеспечения производственного процесса необходимыми видами энергии, что важно для государства в целом. С другой стороны, позволяет минимизировать затраты на непосредственное энергообеспечение производства, что прежде всего интересует предприятие как экономический субъект. Решение задачи при разработке модернизации энергообеспечения предприятия требует структурно-параметрической оптимизации не только ТЭСПП, но и расширенной системы, включающей кроме ТЭСПП внешние источники энергоснабжения предприятия. Перечисленные цели, как правило, достигаются при структурно-параметрической оптимизации, направленной на подавление потерь эксергии рассматриваемой системы, что придаёт новое качество термодинамическому анализу ТЭСПП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколовский, Л.В. Сбережение тепловой и электрической энергии при производстве бетона и железобетона / Л.В. Соколовский // Строительство и недвижимость [Электронный ресурс]. – 2001. – № 17. – Режим доступа: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2001/17/sn11708.html>. – Дата доступа: 09.04.2012.
2. Соколовский, Л.В. Снижение расхода тепла при производстве бетона и железобетона / Л.В. Соколовский // Строительство и недвижимость [Электронный ресурс]. – 2001. – № 18. – Режим доступа: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2001/18/sn11806.html>. – Дата доступа: 09.04.2012.
3. Ложкин, В.П. Производство сборного железобетона без тепловой обработки / В.П. Ложкин, В.Л. Марцинкевич, И.В. Белецкий // Портал ENGINEERACADEMY.RU [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.engineeracademy.ru/otrasli/construction/483-proizvodstvo-sbornogo-zhelezobetona-bez-teplovooy-obrabotki.html>. – Дата доступа: 28.03.2012.
4. Марьямов, Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н.Б. Марьямов. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.
5. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ); редкол.: Б.А. Крылов [и др.]. – М.: НИИЖБ, 2005. – 275 с.
6. Сазанов, Б.В. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий: учеб. пособие для вузов / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
7. Малец, В. Проблемы энергосбережения в производстве строительных материалов / В. Малец, Е. Подлuzский // Архитектура и строительство [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://ais.by/node/135>. – Дата доступа: 05.04.2012.
8. Малинина, Л.А. Тепловлажностная обработка тяжёлого бетона / Л.А. Малинина. – Москва: Стройиздат, 1977. – 160 с.
9. Романюк, В.Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук / В.Н. Романюк. – Минск, 2010. – 365 л.
10. Шински, Ф. Управление процессами по критерию экономии энергии / Ф. Шински. – М.: Мир, 1981. – 388 с.
11. Современные бетоны: материалы IX междунар. науч.-практ. конф. «Дни современного бетона», Запорожье, 30 мая – 1 июня 2007 г. / ООО «Будиндустрия», Запорожье; под ред. А.В. Ушерова-Маршак [и др.]. – Запорожье, 2007. – 227 с.
12. Бабицкий, В.В. Прогнозирование характеристик твердеющего тяжёлого бетона / В.В. Бабицкий, С.Д. Семенюк, М.С. Бибик // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наукових праць. – Рівне, 2009. – Вип. 18. – С. 3 – 12.

Поступила 06.05.2012

FORMATION OF THE RATIONAL HEAT POWER SYSTEM OF FERRO-CONCRETE PRODUCTS ENTERPRISES AT THEIR MODERNISATION

A. NIYAKOVSKI

Questions of thermal energy and electrical power consumption in heat power systems of industrial factories producing prefabricated concrete are observed. The structure of energy consumption is analyzed; the influence of chemical solidification accelerators and a range of concrete thermal treatment processing methods on energy consumption quantity and extension are shown. The estimation of thermal energy and electrical power specific consumption structure and quantity variation for prefabricated concrete production is offered. The generalized block diagram of concrete products factories heat power system is presented and basic principles of such factories heat power system perfecting at production and technology upgrading for the purpose of power consumption optimization and expenses on primary energy decreasing are formulated.

УДК 621.642

**КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**

*канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО, А.И. БОНДАРЧУК
(Полоцкий государственный университет)*

Исследуется главная причина возникновения аварий при эксплуатации резервуаров – большой износ резервуарного парка как следствие истечения срока его службы. Поэтому вопрос надежности и безопасности парка является объектом постоянного внимания органов Государственного надзора в части промышленной, пожарной и экологической безопасности. В состав комплексной безопасности стальных резервуаров входит безопасность, которая обеспечивается на первоначальном этапе или на этапе резервуаростроения, а в дальнейшем на этапе эксплуатации. Важнейшим элементом обеспечения комплексной безопасности и надежности на этапе эксплуатации выступает ремонт стальных резервуаров. В зависимости от конструктивного элемента и вида дефектов разрабатываются карты примерных исправлений дефектов в стальных резервуарах. Такой подход позволяет уменьшить трудоемкость и себестоимость процессов устранения дефектов и обеспечить работоспособность и надежность резервуаров.

Введение. На территории Беларуси для хранения нефти и нефтепродуктов используются резервуары самых разнообразных конструктивных решений. Всего на территории встречаются более 700 резервуаров, общим объемом порядка 1,5 млн. м³. Наиболее распространенными являются резервуары стальные и железобетонные, преимущественно стальные вертикальные цилиндрической конструкции (РВС).

В мировой практике вопросам резервуаростроения уделяется достаточно много внимания. Связано это прежде всего с тем что вертикальные цилиндрические резервуары для нефти и нефтепродуктов представляют собой весьма ответственные инженерные сооружения, авария которых может привести к экономическому и экологическому ущербу.

В экстремальных случаях, по статистическим данным, общий материальный ущерб превышает в 500 и более раз затраты на сооружение резервуаров.

Резервуары для нефти и нефтепродуктов остаются одними из наиболее опасных объектов. Это связано с целым рядом причин, наиболее характерные из которых следующие:

- высокая пожаровзрывоопасность хранимых продуктов;
- крупные размеры конструкций и связанная с этим протяженность сварных швов, которые трудно проконтролировать по всей длине;
- несовершенство геометрической формы, неравномерные просадки оснований;
- большие перемещения стенки, особенно в зонах геометрических искажений проектной формы;
- высокая скорость коррозионных повреждений;
- малоцикловая усталость отдельных зон конструкции стенки;
- сложный характер нагружения конструкции в зоне уторного шва и другие.

Но самой главной причиной является большой износ резервуарного парка вследствие истечения срока службы резервуаров. Поэтому вопрос надежности и безопасности резервуаров является объектом постоянного внимания органов Государственного надзора в части промышленной, пожарной и экологической безопасности.

Обеспечение комплексной безопасности. В состав комплексной безопасности стальных резервуаров входит безопасность, которая обеспечивается на первоначальном этапе или на этапе резервуаростроения, а в дальнейшем – на этапе эксплуатации.

Важнейшим элементом обеспечения комплексной безопасности и надежности на этапе эксплуатации выступает ремонт стальных резервуаров.

На первоначальном этапе одним из направлений повышения надежности резервуаров является совершенствование технической нормативной правовой базы. Значительный прогресс в области разработки и совершенствования норм по проектированию и устройству резервуаров достигнут в Российской Федерации. В последнее время там были разработаны и введены следующие стандарты:

- ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов (введены в 2003 году);
- ГОСТ Р 52910-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов (введен в 2008 году);

- СА-03-008-08. Стандарт Ассоциации. Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности;
- СТО 0030-2004. Стандарт организации. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Правила технического диагностирования, ремонта и реконструкции;
- СТО-СА-03-002-2009. Стандарт организации. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов (введен в 2009 году);
- ГОСТ 31385 -2008. Межгосударственный стандарт. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия (введен в 2010 году).

В Республике Беларусь также ведется работа по разработке норм в области резервуаростроения.

Специалистами кафедры трубопроводного транспорта УО «ПГУ» совместно с ОАО «Нефтезавод-монтаж» разработан и введен в действие в 2010 году технический кодекс установившейся практики ТКП 45-5.04-172-2010 «Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. Правила проектирования и устройства». При разработке документа были проанализированы различные стандарты в области резервуаростроения, такие как API 650, EN 14015, указанные выше российские нормы, стандарты Украины, Казахстана, Польши. В наибольшей степени ТКП гармонизирован с нормами России.

Необходимость разработки ТКП была обусловлена значительным прогрессом в технологии изготовления резервуаров, повышением требований к качеству их изготовления, внедрением новых, передовых методов изготовления, сварки и антикоррозионной защиты, необходимостью строительства новых и замены исчерпавших эксплуатационный ресурс резервуаров. Задачей ТКП является разработка комплекса основных требований по проектированию и изготовлению резервуаров, которые обеспечат высокое качество строительства резервуаров и безопасность их эксплуатации; ТКП устанавливает требования к резервуарам номинальным объемом от 100 до 120 000 м³ для хранения нефти и нефтепродуктов под избыточным давлением, близким к атмосферному давлению.

В некоторых случаях ТКП допускает применение альтернативных решений при условии согласования их с головной организацией по сварке (требования к термообработке, требования к обработке кромок и т.п.). Это связано с тем, что технологии обработки металлов, сварки, изготовления и монтажа резервуарных конструкций постоянно совершенствуются, вместе с тем совершенствуется оборудование и методы производства работ.

Например, некоторые стандарты в области резервуаростроения предъявляют требования к термообработке врезок в стенку резервуара и эти требования отличаются друг от друга в различных стандартах. Новый стандарт СТО-СА-03-002-2009 (Россия) [1] устанавливает требования в зависимости от диаметра врезки, толщины и предела текучести стали.

Так, при проектировании РВС объемом 20000 м³ для ЛПДС «Мозырь» использовалась сталь 09Г2С с пределом текучести 325 МПа с параметрами толщины стенки нижнего пояса 19 мм. Согласно проекту термообработка врезок при сварке не требуется (проектирование по ПБ 03-605-03), однако по новому стандарту России [1] для толщин стенки свыше 18 мм с пределом текучести от 295 до 345 МПа необходимо проводить термообработку. В этом случае было принято решение, что допускается не производить термообработку врезок в отдельных случаях, по согласованию головной специализированной организации по сварке, так как предел текучести относится к граничным условиям.

Однако разработка нормативно-технического правового акта по проектированию стальных вертикальных резервуаров является первым шагом для разработки системы комплексной безопасности стальных резервуаров. Следующим шагом необходимо рассмотреть вопрос о поддержании надежности резервуаров в процессе строительства и эксплуатации.

Одним из нормативных документов, в котором рассмотрены вопросы надежности, является ТКП 169-2009 (09100) «Правила технической эксплуатации резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [2] (утвержден и введен в действие приказом концерна «Белнефтехим» в 2009 году). В Правилах есть раздел, в котором приведены требования к профилактическим осмотрам резервуаров.

Так, ежедневный осмотр резервуаров обслуживающим персоналом должен производиться не реже 1 раза в сутки (смену); осмотр лицами, ответственными за безопасную эксплуатацию резервуаров, – не реже 2 раз в месяц; осмотр комиссией – не реже 1 раза в 6 месяцев.

Например, осмотр резервуаров с плавающей крышей или понтоном должен проводиться ежедневно. При этом необходимо проверять положение плавающей крыши или понтона, отсутствие видимого крена, отсутствие продукта или воды на поверхности плавающей крыши (понтон) и т.п.

Все вышеперечисленное позволяет увеличить надежность эксплуатации резервуаров и предотвратить возникновение дефектов, тем самым уменьшить вероятность появления аварийных разливов нефти и нефтепродуктов и аварий в целом.

Однако, согласно литературным данным, из всех зарегистрированных случаев аварий четвертая часть выпадает на пожары и аварии, связанные с нарушением целостности резервуаров, которые возникают под воздействием внешних факторов, нарушением правил эксплуатации и возникновением дефектов в элементах конструкций резервуаров.

Стальные резервуары в отличие от аналогичных железобетонных имеют меньшую стоимость строительства и трудоемкость. Однако они сравнительно металлоемки и подвержены коррозии.

Поэтому главная задача при эксплуатации стальных резервуаров – поддержать их работоспособность, в том числе и эксплуатационную надежность.

Дефекты резервуаров, влияющие на эксплуатационную надежность стальных вертикальных резервуаров, можно классифицировать по ряду признаков. Одним из них является *классификация по времени образования*: в процессе изготовления металлопроката (делятся на дефекты образования); в процессе производства рулонных заготовок; в процессе транспортировки рулонных заготовок; в процессе монтажа, эксплуатации резервуара [3].

1. К *металлургическим дефектам* (появившимся в процессе изготовления металлопроката) относятся следующие: закаты, расслоения, неравномерное легирование, задиры, микротрещины, нарушения геометрии проката.

2. К *заводским дефектам* (появившимся в процессе производства рулонных заготовок) относят: свищи, непровары, газовые поры, микротрещины, нарушение геометрии сварного шва, шлаковые включения, смещение стыкуемых кромок, грубая чешуйчатость, кратеры, подрезы.

3. К *транспортным дефектам* (появившимся в процессе транспортировки рулонных заготовок к месту монтажа) относятся такие дефекты, как гофры на поверхности рулона, смятие части рулона, локальные вмятины на крае рулона, регулярный прогиб в продольном направлении.

4. *Монтажные дефекты* можно разделить на две подгруппы:

4.1. Дефекты сварки, к которым относятся: свищи, непровары, газовые поры, микротрещины, нарушение геометрии сварного шва, шлаковые включения, смещение стыкуемых кромок, грубая чешуйчатость, кратеры подрезы, прожоги в местах установки временных креплений и отсутствие сварных швов.

4.2. Дефекты монтажа и подготовки основания, к которым относятся: некачественная подготовка основания, жесткое закрепление шахтных лестниц, местные пластические деформации стенки, вырывы металла из полотнища при разворачивании, неубранные остатки монтажных приспособлений, сквозные пробои металлоконструкций техникой, подтягивание части окрайки к стенке РВС перед сваркой, отсутствие фундамента под задвижками, смещение стыкуемых полотнищ в вертикальной плоскости, угловатость монтажных швов.

5. *Эксплуатационные дефекты* делятся на две группы:

5.1. Коррозийные дефекты, к которым относят коррозию сварных соединений и металлоконструкций. Коррозийные дефекты по виду коррозии в свою очередь подразделяются на сплошную поверхностную коррозию, сквозную и очаговую (язвенную и питтинговую).

5.2. Нарушение геометрической формы, к которым могут относиться угловые перемещения или изгиб окрайки, локальная потеря устойчивости, хлопуну стенки или днища, осадка резервуара. Осадка может быть как равномерной (по площади или периметру основания), так и неравномерной (осадка по площади, по периметру основания, крен).

По первым трем позициям дефекты устраняются после обнаружения при изготовлении металлоконструкций резервуара на производстве либо выбраковываются.

Наиболее опасными являются монтажные дефекты, появившиеся при некачественном монтаже резервуаров на площадке и не выявленные в процессе контроля при сооружении и эксплуатационные (появившиеся, в том числе, и в процессе монтажа).

К наиболее часто встречающимся дефектам относятся:

- дефекты монтажных сварных швов;
- вырывы металла и остатки при варке монтажных приспособлений на первом поясе стенки;
- сквозные отверстия в настиле крыши;
- неравномерная осадка РВС;
- угловатость монтажных швов;
- недопустимые отклонения от вертикали;
- хлопуну на днище;
- хлопуну на стенке РВС, вмятины и выпучины;
- коррозионные повреждения утора и первого пояса стенки;
- коррозионные повреждения окрайков;
- коррозионные повреждения полотнища днища.

Перечисленные дефекты также можно классифицировать по конструктивным элементам резервуара:

- основание;
- днище;
- окрайки днища;
- стенка;
- крыша;
- другие элементы (лестница, понтоны).

В зависимости от конструктивного элемента и вида дефектов разрабатываются карты примерных исправлений дефектов в стальных резервуарах.

Выводы:

Подход с использованием разработанных карт позволяет уменьшить трудоемкость и себестоимость процессов устранения дефектов и обеспечить работоспособность и надежность резервуаров.

Для систематизации процесса ремонта резервуаров должен быть разработан соответствующий ТНПА. Несмотря на то, что такого рода документы существовали в СССР и частично заменены в Беларуси на локальные, они не отвечают современным нормативным требованиям, в том числе Евросоюза, технологиям и применяемым материалам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарт организации. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов: СТО-СА-03-002-2009.
2. Правила технической эксплуатации резервуаров для нефти и нефтепродуктов: ТКП 169-2009 (09100).
3. Алиев, Р.А. Сооружение газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз / Р.А. Алиев, И.В. Березина, Л.Г. Телегин. – М.: Недра, 1987.

Поступила 18.04.2012

**THE COMPLEX SAFETY
OF STEEL RESERVOIRS OF OIL AND MINERAL OIL**

L. SPIRIDYONOK, A. BONDARCHUK

The main reason of accidents is a great physical weariness of tank farm as a result of reservoir lifetime. That is why the question of reliability and safety of reservoir park is paid a large attention from bodies of Governmental supervision in industrial, fire and ecological safety. Safety as a part of complex safety of steel reservoirs is provided on the first stage or on stage of construction and further on the stage of maintenance. The most important element of complex safety and reliability on the stage of maintenance is repairing of steel reservoirs. The schemes of repairing of steel reservoirs depend on constructive elements and kind of defects. This approach allows to reduce laboriousness and cost price of repairing and provide operability and reliability of reservoirs.

УДК 666.97.035.55

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕР
ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА****А.М. НИЯКОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Э.И. ГОНЧАРОВ, Е.С. ДОБРОСОЛЬЦЕВА
(Полоцкий государственный университет)**

Рассматриваются варианты организации процесса охлаждения пропарочных камер для обработки изделий из железобетона в условиях постепенного снижения температуры греющей среды и поддержания 100 % влажности этой среды. Предлагается для пропарочных камер с наружными стенами, выступающими на высоту более 1,5 м над уровнем пола цеха, разместить на этих стенах систему охлаждения в виде контуров естественной циркуляции технической воды, подёмные и опускные ветви каждого из которых расположены на внутренней и наружной поверхностях стен камеры; для напольных камер, наружные стены которых углублены в землю, в качестве системы охлаждения после окончания термообработки изделий целесообразно использовать подачу во внутренний объём камеры через специальные форсунки диспергированных струй технической воды, на которых будет конденсироваться насыщенный водяной пар. Представлен расчёт процесса конденсации пара на поверхности подёмных труб контуров естественной циркуляции технической воды и для камеры конкретного внутреннего объёма определена общая длина подёмных труб.

Введение. Основным методом ускоренного твердения сборного железобетона на заводах железобетонных изделий является тепловлажностная обработка. Наиболее распространено пропаривание изделий в ямных камерах при давлениях греющей среды, несколько превышающих атмосферное. Весь процесс тепловлажностной обработки разбивается на три стадии: нагрев до достижения поверхностью изделия температуры изотермической выдержки; изотермическая выдержка; охлаждение до температуры выгрузки. Причём основные деструктивные процессы и структурные нарушения в бетоне возникают, наряду со стадией подъёма температуры, на стадии охлаждения. Эти нежелательные процессы, возникающие при пропаривании бетона, можно значительно уменьшить правильным выбором продолжительности предварительной выдержки свежеформованного изделия, скорости подъёма температуры греющей среды, а также скорости её снижения после окончания активного периода термообработки. Снижение температуры греющей среды в пропарочной камере должно производиться постепенно, чтобы перепад температур между поверхностью изделий и окружающим воздухом при выгрузке изделий из камер не превышал 40 °С [1]. Кроме температурного режима на процесс ускоренного набора прочности изделиями существенное влияние оказывает относительная влажность греющей среды. Известно [2], что стадию охлаждения изделий следует проводить при 100 % влажности среды в камере, поскольку в этом случае прочность бетона повышается на 20 %, снижается пористость, что значительно увеличивает его морозостойкость. Если же среда в камере будет ненасыщенной, с поверхности изделий начнёт испаряться влага, что приведёт к образованию трещин, уплотнению оболочек новообразований и, как следствие, вызовет затухание набора прочности.

Указанное выше соображение необходимо учитывать при выборе технической системы, обеспечивающей остывание изделий в закрытой пропарочной камере. Приём вентилирования внутреннего объёма пропарочных камер, требующий установки специального оборудования, затрат электроэнергии на привод вентиляторов, расхода пара на эжекторные затворы, не может обеспечить 100 % влажности среды в период охлаждения, поэтому представляется целесообразным предложить систему снижения температуры среды, исключающую подачу воздуха в закрытую пропарочную камеру. Кроме того, если не организовать процесс снижения температуры греющей среды, после открытия крышек камер, в которых пропаривались изделия, пар, не успевший сконденсироваться внутри камеры, попадает в помещение цеха. Поскольку температура в помещении ниже температуры насыщения, пар сконденсируется в воздухе в виде тумана, что на определённое время создаст сложные санитарно-гигиенические условия для работающих в цехе, ухудшая видимость, а дальнейшая конденсация на оборудовании и ограждениях будет способствовать коррозии и снижению теплозащитных свойств последних.

Технические решения. В зависимости от конструкции пропарочных камер возможны два варианта организации процесса их охлаждения после окончания термообработки железобетонных изделий. Если наружные стены пропарочной камеры выступают на высоту более 1,5 м над уровнем пола цеха, на них можно разместить систему охлаждения в виде контуров естественной циркуляции технической воды, подёмные и опускные ветви каждого из которых расположены на внутренней и наружной поверхностях стен камеры.

На рисунке 1 приведено аксонометрическое изображение части стены пропарочной камеры со схемой расположения контура естественной циркуляции. На рисунке 2 показан общий вид подёмной ветви внутри камеры; на рисунке 3 – разрез А – А изображения рисунка 2. Пропарочная камера содержит днище 1, крышку (на рисунках не показана), стены 2 с размещением по их периметру гидрозатвора 3 и контуров естественной циркуляции технической воды, опускные ветви которых 4 размещены на наружных

поверхностях стен камеры 2, а подъёмные ветви, составленные из отдельных труб 5 и гибов труб 6 – на внутренних поверхностях стен. Для интенсификации процессов теплопередачи трубы 5 имеют ребра 7.

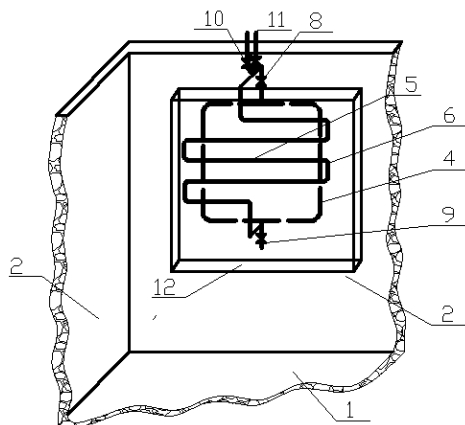


Рис. 1. Схема расположения контуров естественной циркуляции в пропарочной камере

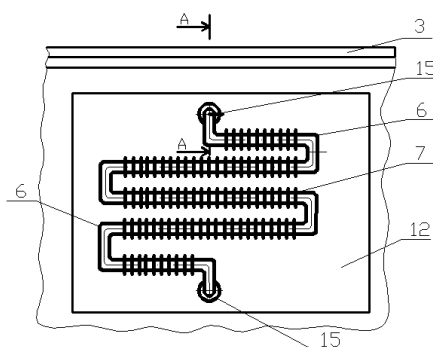


Рис. 2. Общий вид подъемной ветви внутри камеры

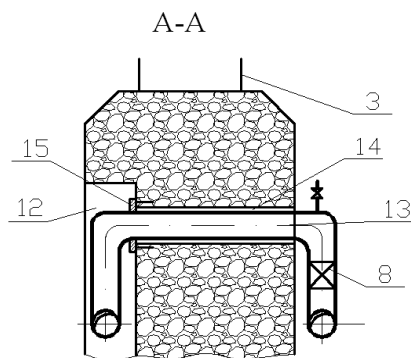


Рис. 3. Разрез А – А

Расчёт процесса конденсации пара на поверхности горизонтальных труб. В процессе расчёта необходимо определить поверхность горизонтальных труб, которая может обеспечить конденсацию находящегося в камере пара за заданный промежуток времени.

Количество теплоты, которое необходимо отвести от пара, чтобы он конденсировался, Дж,

$$Q = r \cdot G'', \quad (1)$$

где r – теплота парообразования Дж/кг; G'' – количество пара в камере, кг.

Количество теплоты, которое необходимо передать воде, циркулирующей в контуре, Дж,

$$Q = \bar{\alpha} \cdot \Delta t \cdot F \cdot \tau. \quad (2)$$

Здесь $\bar{\alpha}$ – средний по периметру коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); $\Delta t = t_s - \bar{t}_c$ – средний температурный напор, °С; F – общая поверхность подъёмной ветви контура циркуляции, м²; τ – время, необходимое для конденсации пара, с.

Опускная ветвь каждого контура циркуляции снабжена запорным вентилем 8, который расположен в верхней части ветви, дренажным вентилем 9, воздушником 10 и вентилем с патрубком 11, который расположен в верхней части ветви, для заполнения контура охлаждающим агентом. Для защиты от механических повреждений при перезагрузке камеры трубы подъёмных ветвей контура циркуляции размещены в нишах 12. Опускные и подъёмные ветви каждого из контуров естественной циркуляции охлаждающего агента соединены горизонтальными трубами 13, пропущенными через образованные в стенах камеры сквозные каналы 14 и жёстко закреплёнными на внутренней поверхности стен пропарочной камеры при помощи накладок 15.

До начала термообработки изделий в пропарочной камере контуры циркуляции с помощью вентиля с патрубком 11 при открытых воздушниках 10 заполняются технической водой, которую в случае необходимости через дренажный вентиль 9 можно слить.

После загрузки камеры изделиями, подъёма температуры и окончания периода изотермического прогрева открывается запорный вентиль 8 и в контуре начинается циркуляция технической воды. На подъёмных ветвях контуров начинается интенсивная конденсация пара, тепло которого будет передаваться к опускным ветвям 4, а от них – окружающему воздуху помещения. После окончания периода охлаждения перед выгрузкой изделий вентиль 6 закрывается и циркуляция воды прекращается.

Для напольных камер, наружные стены которых углублены в землю, в качестве системы охлаждения после окончания термообработки изделий целесообразно использовать подачу во внутренний объём камеры через специальные форсунки диспергированных струй технической воды, на которых будет конденсироваться насыщенный водяной пар. Конденсация пара на распылённой струе отличается высокой интенсивностью из-за резкого увеличения поверхности контакта воды и пара и уменьшения термического сопротивления переносу теплоты. Схема размещения диспергирующих форсунок по периметру камеры приведена на рисунке 4. Диспергирующая форсунка 1 размещена на коллекторе для технической воды 2, который расположен на днище камеры 3 по её периметру. Диспергируемые струи воды подаются в пространство между внутренней поверхностью стен камеры и пакетом пропариваемых изделий. Конструкция диспергирующей форсунки представлена на рисунке 5 и включает корпус 1, завихритель 2, сопло 3, прокладку 4.

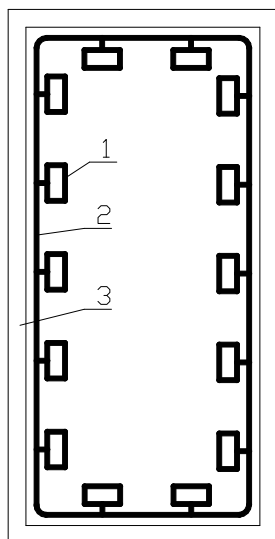


Рис. 4. Схема размещения форсунок в пропарочной камере

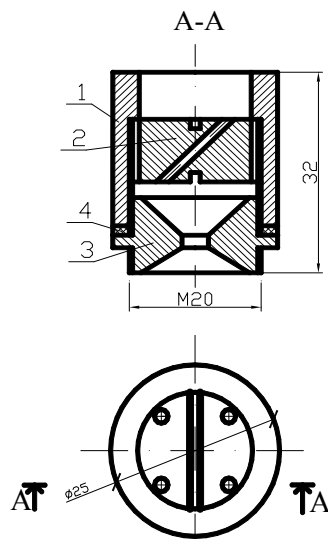


Рис. 5. Конструкция диспергирующей форсунки

Расчёт среднего по окружности горизонтальной трубы коэффициента теплоотдачи проведём по формуле [3]:

$$\bar{\alpha} = 0,72 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot r \cdot \lambda_{\text{жс}}^3}{v_{\text{жс}} \cdot d \cdot (t_s - \bar{t}_c)}}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; $\lambda_{\text{жс}}$ – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·°C); r – теплота парообразования, Дж/кг; $\rho_{\text{жс}}$ – плотность воды, кг/м³; $v_{\text{жс}}$ – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; d – наружный диаметр трубы, м; t_s – температура насыщенного пара, °C; $\bar{t}_c$ – средняя температура поверхности стенки трубы, °C.

Для расчёта примем следующие значения входящих в формулы величин: температура насыщенного пара в камере $t_s = 100$ °C; средняя температура поверхности стенки трубы $t_c = 90$ °C; коэффициент теплопроводности $\lambda_m = 0,676$ Вт/(м·°C); теплота парообразования $r = 2256,7$ кДж/кг; плотность воды $\rho_{\text{жс}} = 999,8$ кг/м³; кинематический коэффициент вязкости $v_{\text{жс}} = 0,326 \cdot 10^{-6}$ м²/с; наружный диаметр $d = 25$ мм; время, необходимое для конденсации пара $\tau = 3600$ с. Суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha = 6233$ Вт/(м²·°C).

Размеры пропарочной камеры составляют: длина – 7,0 м; ширина – 3,75 м; глубина – 2,8 м; объём камеры 73,5 м³. Камера загружена на 0,2 своего объёма. Тогда объём паровоздушной смеси $V_{\text{см}} = 58,8$ м³. Примем расчётное содержание пара в смеси 95 % и получим объём насыщенного пара $V'' = 56$ м³, плотность насыщенного пара $\rho = 0,59$ кг/м³, весовое количество пара в камере $G'' = 56 \cdot 0,59 = 33$ кг. Следова-

тельно, общая поверхность подъёмной ветви контура циркуляции (1), (2) $F = \frac{r \cdot G''}{\bar{\alpha} \cdot \Delta t \cdot \tau} = 0,66$ м², а общая

длина подъёмной ветви контура циркуляции $l = F / \pi \cdot d = 8,4$ м.

Расчёт процесса конденсации пара на диспергированной струе воды. Для приближенного расчёта процесса конденсации примем, что термическое сопротивление передачи теплоты от пара к воде, из-за высокой интенсивности процесса конденсации, пренебрежимо мало. Так, в [4] межфазное термическое сопротивление оценивается величиной порядка 10^{-7} м²·°C/Вт, поэтому количество холодной воды, подаваемой через диспергирующие форсунки в пропарочную камеру, определим из балансовых уравнений.

Количество теплоты, которое необходимо отвести от пара, определяется формулой (1). Количество теплоты, которое необходимо передать охлаждающей воде, Дж:

$$Q = C_{mp} \cdot (t_s - t_0) \cdot G_6, \quad (4)$$

где C_{mp} – изобарная теплоёмкость жидкости, Дж/(кг·°C); t_s – температура насыщения при давлении в камере, °C; t_0 – температура воды на входе в камеру, °C; G_6 – полное количество воды, кг.

Отсюда количество холодной воды, необходимой для конденсации пара в камере, будет равно, кг,

$$G_6 = \frac{G'' \cdot r}{C_{mp} \cdot (t_s - t_0)}. \quad (5)$$

Удельный расход воды через одну форсунку, кг/с,

$$g_s = \frac{G_s}{n \cdot \tau} = \frac{G'' \cdot r}{C_{mp} \cdot (t_s - t_0) \cdot n \cdot \tau}, \quad (6)$$

где n – количество форсунок; τ – время работы.

Для расчётов примем: температура насыщения пара в камере $t_s = 100$ °С, температура охлаждения воды $t_0 = 15$ °С; изобарная теплоёмкость воды $C_{mp} = 4,19$ кДж/(кг·°С); теплота парообразования $r = 2256,7$ кДж/кг; давление среды в камере $p_s = 10^5$ Па; давление воды $p_0 = 4 \cdot 10^5$ Па; плотность воды $\rho = 999,8$ кг/м³; количество диспергирующих форсунок $n = 14$; время, необходимое для конденсации, $\tau = 3600$ с.

Размер пропарочной камеры: длина – 14,2 м; ширина – 4,2 м; глубина – 1,1 м. Следовательно, объём камеры составит 65,6 м³. Рассмотрим расчётный случай, когда камера загружена на 0,2 своего объёма, тогда объём паровоздушной смеси $V_{см} = 52,5$ м³. Приняв расчётное содержание пара в смеси 95 %, получим объём насыщенного пара $V'' = 0,59$ кг/м³, весовое количество пара в камере $G'' = 50 \cdot 0,59 = 29,5$ кг. Тогда удельный расход воды через форсунку (6) составит $g_s = 0,0039$ кг/с. Давление воды на входе в форсунку $p_0 = 4 \cdot 10^5$ Па, истечение происходит в среду с давлением $p_s = 1 \cdot 10^5$ Па. Скорость истечения

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p_s)}{\rho}} = 24,5 \text{ м/с}; \text{ площадь выходного сечения сопла } f = \frac{g_s}{\omega \cdot \rho} = 1,59 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2; \text{ диаметр проход-$$

$$\text{ного сечения } d = \sqrt{\frac{4 \cdot f}{\pi}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,5 \text{ мм.}$$

Закключение. Показана возможность осуществления охлаждения внутренней среды пропарочных камер для термообработки изделий из железобетона после её завершения. Предложены способы организации процесса охлаждения пропарочных камер для двух вариантов конструкций наружных стен: конденсация водяного пара на трубах контуров естественной циркуляции или на диспергированных струях технической воды, подаваемой в камеру через специальные форсунки. Предложены расчётные зависимости и проведены расчёты процесса конденсации пара для этих случаев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марьямов, Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н.Б. Марьямов. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.
2. Мчедлов-Петросян, О.П. Повышение эффективности типовых пропарочных камер / О.П. Мчедлов-Петросян // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1980. – № 1. – С. 85 – 91.
3. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Высш. шк., 1975. – 495 с.
4. Исаченко, В.П. Теплообмен при конденсации / В.П. Исаченко. – М.: Высш. шк., 1975. – 238 с.

Поступила 25.05.2012

THE ORGANIZATION OF REFRIGERATING PROCESS OF STEAM-CURING CHAMBERS AFTER THE TERMINATION OF THERMAL TREATMENT OF STEEL CONCRETE PRODUCTS

A. NIYAKOVSKI, E. GONCHAROV, E. DOBROSOLTSEVA

Alternatives of organization of refrigerating process of steam-curing chambers for treatment of steel concrete products in conditions of a gradual temperature reduction of heating medium and 100 % of moisture content of this medium are tendered. For steam-curing chambers, whose external walls overhand in altitude more than 1,5 m over a shop floor level, on these walls it is offered to arrange a cooling system in the form of outlines of a natural circulation of service water. Elevating and descending branches of each of these outlines are situated inside or outside the surface of a chamber wall. For low-ground chambers, whose external walls are deepened in the ground, as a cooling system after the termination of thermal treatment of products, it is expedient to use feed in intrinsic bulk of the chamber through special atomizers of spray jets of service water. Saturated steam will condense on them. Calculation of the process of devaporation on a surface of lifting pipes of outlines of a natural circulation of service water has been done. And for the chamber of concrete intrinsic bulk the total length of lifting pipes has been determined. As a result of process calculation of a spray jet of water for the chamber of concrete intrinsic bulk, water flow through one atomizer and the diameter of its flow area have been determined.

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.063

АЛГОРИТМ ПЕРЕХОДА ОТ НЕЛИНЕЙНОГО К ЛИНЕЙНОМУ ОБОБЩЁННОМУ МЕТОДУ ЛР-ОЦЕНОК

А.Ю. БУДО

(Белорусский национальный технический университет, Минск);

д-р техн. наук, проф. В.И. МИЦКЕВИЧ

(Полоцкий государственный университет)

Исследуется алгоритм перехода от нелинейного к линейному обобщённому методу Лр-оценок. Выполнено теоретическое обоснование обобщённого метода Лр-оценок, не имеющего аналогов на постсоветском пространстве при обработке зависимых результатов геодезических измерений в альтернативных методах уравнивания. На тестовом примере показано, что для данной задачи нелинейные методы всегда имеют устойчивое, но неоднозначное решение, что подтверждает теоретические выводы авторов.

Метод Лр-оценок принадлежит к группе методов уравнивания. Различают коррелятный и параметрический способы уравнивания. В данной статье уделено внимание параметрическому способу. Если уравнивание выполняется средствами линейной алгебры, методы называют линейными. В противном случае – нелинейными, использующими алгоритмы решения систем нелинейных уравнений, методами нелинейного программирования.

Обратимся к основному критерию метода наименьших квадратов:

$$V^T P V \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $V_{N \times 1}$ – вектор поправок в результаты измерений; $P_{N \times N}$ – диагональная матрица весов измерений, число которых равно N .

Компоненты вектора V являются числами, не подлежащими дифференцированию, так как производная скаляра равна 0. Поэтому при решении задач уравнивания методом итерации переходят от условия (1) к критериальной функции:

$$\Phi(X) = L^T(X) \cdot P \cdot L(X), \quad (2)$$

где $X_{t \times 1}$ – вектор координат определяемых пунктов при числе параметров t ; $L(X)$ – вектор свободных членов, в общем случае нелинейных параметрических уравнений, записываемых в виде

$$L(X) = \varphi(X) - T = T^{\text{выч}} - T^{\text{изм}}, \quad (3)$$

где $\varphi(X)$ – функция координат; $T_{N \times 1}$ – вектор результатов измерений.

Если достигнут минимум целевой функции (2), вектор X обозначают $\hat{X}$ – оценки параметров, для которых справедливо равенство:

$$V = L(\hat{X}) - \varphi(\hat{X}) - T = T^{\text{уровн}} - T^{\text{изм}}. \quad (4)$$

Минимизацию функции (2) выгодно осуществлять методами нелинейного программирования, записывая её следующим образом:

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^N P_i L_i^2(X). \quad (5)$$

Здесь свободный член берётся в квадрате, поэтому метод назван методом наименьших квадратов (МНК). Если вместо цифры 2 подставить n , получим

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^N P_{ni} |L_i(X)|^n, \quad (6)$$

где при $n = 2$ – МНК; $n = 1$ – метод наименьших модулей (МНМ); $n = 3$ – метод наименьших кубов и т.д.

Минимизация функции (6) соответствует методу Лр-оценок (метод наименьших степеней). Этот метод основан на минимизации n -х степеней остаточных отклонений:

$$\sum_{i=1}^N P_{ii} |L_i(\hat{X})|^n = \sum_{i=1}^N P_{ii} |V|^n$$

и обладает свойствами робастного уравнивания [1, с. 200].

По аналогии перехода от целевой функции (5) к критериальной (2) для функции (6) запишем

$$\Phi(X) = \left(|L(X)|^{\frac{n}{2}} \right)^T \cdot P_n \cdot |L(X)|^{\frac{n}{2}}, \quad (7)$$

где P_n – диагональная матрица весов измерений для различных n .

Формула (7) реализует необобщенный метод Лр-оценок, так как P_n – диагональная неполная матрица. Для корреляционной матрицы K вместо (7) имеем

$$\Phi(X) = \left(|L(X)|^{\frac{n}{2}} \right)^T \cdot K_n^{-1} \cdot |L(X)|^{\frac{n}{2}}. \quad (8)$$

Цель исследования – перейти от нелинейного варианта Лр-оценок к линейному для целевых функций (7) и (8), реализующих необобщенный (классический) и обобщенный методы уравнивания.

Для этого сначала рассмотрим алгоритм минимизации целевых функций по методу Ньютона, который предусматривает итерационный процесс [2, с. 87]:

$$X^{j+1} = X^j - H^{-1}(X^{(j)}) \nabla \Phi(X^{(j)}), \quad (9)$$

где $X^{(j)}$ – вектор неизвестных в j -том приближении;

$$H(X^{(j)}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Phi(X^{(j)})}{\partial x_1^2} & \dots & \frac{\partial^2 \Phi(X^{(j)})}{\partial x_1 \partial x_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 \Phi(X^{(j)})}{\partial x_t \partial x_1} & \dots & \frac{\partial^2 \Phi(X^{(j)})}{\partial x_t^2} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Формула (10) – матрица Гессе вторых частных производных, взятых в точках X^j , а градиент целевой функции имеет вид

$$\nabla \Phi(X) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Phi(X^{(j)})}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial \Phi(X^{(j)})}{\partial x_t} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Если частные производные, входящие в (10) и (11), вычислять численно, метод называется нелинейным, а если вторые производные целевой функции брать аналитически, метод будет линеаризованный, т.е. такой, когда используются методы линейной алгебры.

Далее выполним аналитический контроль формул классического (необобщенного) метода Лр-оценок. Американскими учеными Флетчером, Грантом и Хебденом [3, с. 277] на основе метода Ньютона для целевой функции (7) были получены следующие замкнутые аналитические формулы для матриц H и $\nabla \Phi(X)$ в случае неравноточных измерений:

$$\nabla \Phi(X) = n \cdot A^T \cdot C \cdot L(X); \quad (12)$$

$$H(X) = n(n-1)A^T C A, \quad (13)$$

что привело к равенствам [4, с. 10; 5, с. 6]:

$$X^{(j+1)} = X^{(j)} - \frac{1}{n-1} (A^T C A)^{-1} A^T C L(X^{(j)}), \quad (14)$$

где
$$C = P \cdot \text{diag} \left| L(X^{(j)}) \right|^{n-2}. \quad (15)$$

Методом дифференцирования целевой функции (7) $\frac{\partial \Phi(X)}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial \Phi(X)}{\partial x_2}$ получим градиент целевой функции:

$$\nabla \Phi(X) = n \begin{pmatrix} a_{11} \cdot P_1 \cdot |L_1(X)|^{n-2} L_1(X) + a_{21} \cdot P_2 \cdot |L_2(X)|^{n-2} L_2(X) + a_{31} \cdot P_3 \cdot |L_3(X)|^{n-2} L_3(X) \\ a_{12} \cdot P_1 \cdot |L_1(X)|^{n-2} L_1(X) + a_{22} \cdot P_2 \cdot |L_2(X)|^{n-2} L_2(X) + a_{32} \cdot P_3 \cdot |L_3(X)|^{n-2} L_3(X) \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Продифференцировав $\nabla \Phi(X)$, получим:

$$\frac{\partial^2 \Phi(X)}{\partial x_1^2} = n \cdot n-1 \cdot a_{11} \cdot a_{11} \cdot P_1 \cdot |L_1(X)|^{n-2} + a_{21} \cdot a_{21} \cdot P_2 \cdot |L_2(X)|^{n-2} + a_{31} \cdot a_{31} \cdot P_3 \cdot |L_3(X)|^{n-2};$$

$$\frac{\partial^2 \Phi(X)}{\partial x_1 \partial x_2} = n \cdot n-1 \cdot a_{11} \cdot a_{12} \cdot P_1 \cdot |L_1(X)|^{n-2} + a_{21} \cdot a_{22} \cdot P_2 \cdot |L_2(X)|^{n-2} + a_{31} \cdot a_{32} \cdot P_3 \cdot |L_3(X)|^{n-2};$$

$$\frac{\partial^2 \Phi(X)}{\partial x_2^2} = n \cdot n-1 \cdot a_{12} \cdot a_{12} \cdot P_1 \cdot |L_1(X)|^{n-2} + a_{22} \cdot a_{22} \cdot P_2 \cdot |L_2(X)|^{n-2} + a_{32} \cdot a_{32} \cdot P_3 \cdot |L_3(X)|^{n-2}.$$

Далее применим метод неполной индукции для обобщённого метода Lp-оценок, для которого можно записать

$$\Phi(X) = \left(|L(X)|^{\frac{n}{2}} \right)^T \cdot D \cdot |L(X)|^{\frac{n}{2}},$$

где

$$D = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1N} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{N1} & D_{N2} & \cdots & D_{NN} \end{pmatrix}.$$

Для числа измерений $N = 3$ и числа параметров $t = 2$ имеем:

$$\begin{aligned} \Phi_{x_1, x_2} &= D_{11} |L_1(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} |L_1(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} + D_{12} |L_2(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} |L_1(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} + D_{13} |L_3(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} |L_1(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} + \\ &+ D_{12} |L_1(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} |L_2(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} + D_{22} |L_2(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} |L_2(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} + D_{23} |L_3(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} |L_2(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} + \\ &+ D_{13} |L_1(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} |L_3(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} + D_{23} |L_2(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} |L_3(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} + D_{33} |L_3(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}} |L_3(x_1, x_2)|^{\frac{n}{2}}. \end{aligned}$$

Найдём производные $\frac{\partial \Phi(X)}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial \Phi(X)}{\partial x_2}$ по правилу $uv' = u'v + uv'$.

Окончательно получим

$$\nabla \Phi(X) = n \cdot A_{t \times N}^T \cdot D_{N \times N} \cdot S_{N \times N} \cdot \left\{ |L(X)|^{\frac{n-2}{2}} \cdot \left[|L(X)|^{\frac{n}{2}} \right]_{1 \times N}^T \right\} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}_{N \times 1}. \quad (17)$$

Продифференцировав градиент, найдём вторые частные производные для матрицы Гессе. В результате получим следующие формулы для целевой функции (8), в которой принято обозначение $D = K_n^{-1}$:

$$C_1 = K_n^{-1} \cdot \left\{ |L(X)|^{\frac{n-4}{2}} \cdot \left[|L(X)|^{\frac{n}{2}} \right]_{1 \times N}^T \right\}; \quad (18)$$

$$C_2 = K_n^{-1} \cdot S \cdot \left\{ |L(X)|^{\frac{n-2}{2}} \cdot \left[S \cdot |L(X)|^{\frac{n-2}{2}} \right]_{1 \times N}^T \right\}; \quad (19)$$

$$C_3 = K_n^{-1} \cdot \times S \cdot \left\{ \left| L(X) \right|^{\frac{n-2}{2}} \cdot \left[\left| L(X) \right|^{\frac{n}{2}} \right]^T \right\}, \quad (20)$$

где знак $\cdot \times$ означает поэлементное умножение матриц, $A \cdot \times B = a_{i,j} \cdot b_{i,j}$; $S_{N \times N}$ – диагональная матрица сигналов (единица на диагонали, умноженная на знак числа $L(X)$);

$$x = -H^{-1}G. \quad (21)$$

Здесь H_{ext} – матрица Гессе (вторых частных производных от функции (8)):

$$H = \frac{n|n-2|}{2} Z + \frac{n \cdot n}{2} A^T C_2 A, \quad (22)$$

где Z_{ext} – матрица, элементы которой вычисляются с использованием A и C_1 по формуле:

$$Z_{i,j} = \sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^N a_{k,i} a_{k,j} \cdot C_{1_{k,r}}. \quad (23)$$

Матричную запись для матрицы Z найти не удалось.

Матрица для градиента, входящего в (21), вычисляется по формуле

$$G = n \cdot A^T \cdot C_3 \cdot I, \quad (24)$$

где

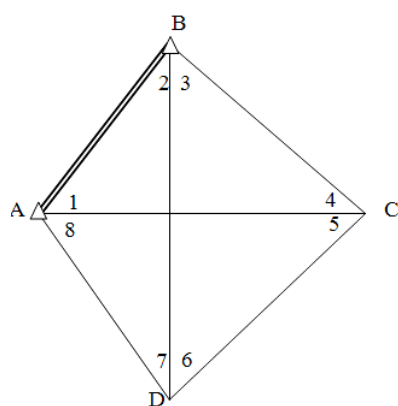
$$I_{N \times 1} = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}_{N \times 1}. \quad (25)$$

Формулы (18) – (25) решают новую задачу обобщённого метода Лр-оценок. При этом в них используется новая формула для корреляционной матрицы

$$K_n^{-1} = P_n^{\frac{1}{2}} R^{-1} P_n^{\frac{1}{2}}, \quad (26)$$

полученная путём обобщения для случая Лр-оценок.

В качестве тестового приведём *пример* уравнивания геодезического четырехугольника (рисунок) с результатами измерений, представленными в таблице 1 [6].



Геодезический четырёхугольник

Таблица 1

Измеренные углы

Номер угла	Величина угла
1	37°58'22"
2	39 18 30
3	61 01 37
4	41 41 41
5	50 01 55
6	27 14 40
7	26 57 40
8	75 45 05

В таблице 2 приведены результаты уравнивания по направлениям, при составлении уравнений поправок для углов и использовании матрицы K_n . При этом в колонках 1, 3, 5 даны результаты уравнивания по нелинейному методу Ньютона, а в колонках 2, 4, 6 – с использованием формул (18) – (26).

Координаты исходных пунктов: $x_A = 1100,00$ м; $y_A = 100,00$ м; $x_B = 1650,00$ м; $y_B = 640,00$ м.

Предварительные координаты определяемых пунктов: $x_C = 1250$ м; $y_C = 1230$ м; $x_D = 100$ м; $y_D = 500$ м.

Таблица 2

Уравнивание геодезического четырёхугольника

Обозначения	$n = 1,5$		$n = 2,0$		$n = 2,5$	
	1	2	3	4	5	6
x_C	1249,932	1249,843	1249,849	1249,919	1249,876	1249,918
y_C	1230,103	1230,103	1230,104	1230,071	1230,090	1230,058
x_D	99,929	99,973	100,003	99,926	99,972	99,958
y_D	500,005	499,930	499,914	499,983	499,941	499,982
μ	8,38	6,88	3,83	5,17	2,16	3,42
M_C	1,088	0,042	0,116	0,065	0,142	0,027
M_D	0,161	0,093	0,173	0,137	0,194	0,041
V_1	-18,9	-0,3	0,7	-14,7	-6,5	-14,7
V_2	12,1	8,8	6,7	16,4	10,3	15,8
V_3	-8,6	-18,3	-14,7	-12,8	-14,1	-15,0
V_4	5,5	-0,2	-2,7	1,1	0,3	3,7
V_5	-2,0	-2,3	1,6	4,2	-2,6	3,1
V_6	30,2	27,8	22,8	14,5	23,4	15,1
V_7	23,2	-0,4	-10	-1,8	0	0,7
V_8	6,7	14,9	25,6	23,2	19,2	21,0
δ	0,01 м		0,01 м		0,01 м	

Анализ данных таблицы 2 свидетельствует о том, что нелинейные методы уравнивания в случае применения зависимых величин оказались неустойчивыми к выбору шага численного дифференцирования (см. колонки 1, 3, 5 таблицы 2); расхождение координат в нелинейных методах по сравнению с линейными составило более 7 см.

В заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

- 1) формулы (12) и (13) для необобщенного метода Lp-оценок можно получить методом неполной индукции, который изложен в данной статье;
- 2) для целевой функции (8) равенства (18) – (25) можно получить только методом неполной индукции из-за сложности применения нелинейного метода Ньютона;
- 3) на примере тестового примера доказано (см. табл. 2), что нелинейный метод Ньютона даёт неоднозначное решение в случае обработки зависимых результатов измерений, что усиливает важность вывода формул (18) – (26) для целевой функции (8).

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркузе, Ю.И. Геодезия. Вычисление и уравнивание геодезических сетей / Ю.И. Маркузе, Е.Г. Бойко, В.В. Голубев; под ред. Ю.И. Маркузе. – М.: Картогеоцентр – Геодезиздат, 1994. – 431 с.
2. Химмельблау, Д.М. Прикладное нелинейное программирование / Д.М. Химмельблау; пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
3. Fletcher, R. The calculation of linear best Lp-approximations / R. Fletcher, I.A. Grant, M.D. Hebden // Computer Journal. – 1971. – V. 14, № 3. – P. 277 – 279.
4. Мещеряков, Г.А. Об уравнивании геодезических измерений с учётом закона распределения ошибок измерений / Г.А. Мещеряков, С.Д. Волжанин, В.В. Киричук // Геодезия и картография. – 1984. – № 2. – С. 9 – 11.
5. Мицкевич, В.И. Уравнивание и оценка точности геодезических сетей методом Ньютона / В.И. Мицкевич, В.В. Ялтыхов; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 1999. – 6 с. – Деп в ОНТИ ЦНИИГАиК 22.03.99, № 658. – гд 1999 // РЖ: 52. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 1999. – № 8. – 08.52.198ДЕП. – С. 27.
6. Мицкевич, В.И. О невозможности поиска грубых ошибок измерений при параметрическом способе уравнивания / В.И. Мицкевич // Геодезия и картография. – 1994. – № 4. – С. 24 – 26.

Поступила 29.03.2012

ALGORITHM FOR THE TRANSITION FROM LINEAR TO NONLINEAR GENERALIZED METHOD OF LP-ESTIMATES

A. BUDO, V. MICEVICH

The algorithm for the transition from nonlinear to linear generalized method of Lp-estimates is under consideration. Theoretical justification of the generalized method of Lp-estimates, which has no analogues in the post-Soviet countries, processing of dependent results of geodesic measurements in alternative compensation methods, is carried out. It is shown on the test example that for the given task nonlinear methods always have invariable, but ambiguous solution, that is proved by the theoretical conclusions.

УДК 528.063

СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ НУЛЬ-СВОБОДНЫХ ПЛАНОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, НЕ СОДЕРЖАЩИХ ИСХОДНЫХ ПУНКТОВ

канд. техн. наук, доц. Г.Е. ГОЛОВАНЬ,
канд. техн. наук, доц. И.П. ШЕВЕЛЕВ, канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются вопросы получения обратной матрицы весов, используемой для оценки точности функции измеренных и уравненных величин для случая, когда геодезические сети не содержат исходных пунктов. Такие сети называют нуль-свободными. Отмечается, что для обработки нуль-свободных плановых геодезических сетей можно применять как известные методы, предложенные академиком А.Н. Тихоновым; методы, использующие псевдоинверсию; метод, основанный на использовании координат всех пунктов геодезической сети, так и новый метод, предложенный профессором В.И. Мицкевичем. Выполнено сравнение одного из известных методов обработки нуль-свободных геодезических сетей с новым, использующим алгоритм рекуррентного уравнивания, широко применяемый в геодезии благодаря трудам профессора Ю.И. Маркузе.

Известно, что для геодезических сетей, не содержащих исходных пунктов (так называемых нуль-свободных), определитель матрицы системы нормальных уравнений при параметрическом способе уравнивания равен нулю, т.е. говорят, что эта матрица вырожденная. Существуют несколько методов получения обратной матрицы весов Q от вырожденной матрицы коэффициентов системы нормальных уравнений N :

- 1) метод псевдоинверсии, рассчитанный на обработку любых геодезических сетей, но не устойчивый при возмущенных коэффициентах систем уравнений;
- 2) метод регуляризации, предложенный А.Н. Тихоновым (область применения та же, что в первом методе);
- 3) метод Г.Г. Асташенкова (для нивелирных и спутниковых GNSS-сетей);
- 4) метод В.Н. Ганьшина (только для нивелирных сетей);
- 5) метод, основанный на использовании координат всех пунктов геодезической сети (для плановых и пространственных сетей);
- 6) метод В.И. Мицкевича с областью применения первых двух.

Нами выполняется сравнение пятого метода обработки нуль-свободных геодезических сетей с новым, шестым методом, использующим алгоритм рекуррентного уравнивания.

Рекуррентное (последовательное) уравнивание благодаря исследованиям по выбору исходной матрицы обратных весов неизвестных [3; 4] оказалось широко применяемым для решения многих современных задач уравнивательных вычислений.

В данной работе приведены новые формулы для вычисления главных псевдообратных матриц A^+ и $N^+ = (A^T P A)^+$ на базе параметрического уравнивания. Это позволило уравнивать любые сети (несвободные, нуль-свободные и свободные), содержащие или не содержащие дефекты данных.

Основные формулы обработки нуль-свободных геодезических сетей для пятого и шестого методов. Главная формула пятого метода, основанного на использовании координат всех пунктов нуль-свободной геодезической сети [1]:

$$(A^T P A)^+ = (A^T P A + R^T R)^{-1} - R^T (R R^T R R^T)^{-1} R, \quad (1)$$

где

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ Y_1 & -X_1 & Y_2 & -X_2 & \dots & Y_k & -X_k \\ X_1 & Y_1 & X_2 & Y_2 & \dots & X_k & Y_k \end{pmatrix}, \quad (2)$$

в которой X_k, Y_k – координаты пунктов, отнесенные к центру сети (уклонения от X_{cp}, Y_{cp}); k – количество всех пунктов геодезической сети.

Обозначим $N = (A^T P A)$, тогда $N^+ = (A^T P A)^+$ – псевдообратная матрица системы нормальных уравнений.

Основной формулой шестого метода является выражение [2], справедливое для любой матрицы N :

$$A^+ = Q_{рек} A^T P^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где $Q_{рек}$ – матрица обратных весов, найденная рекуррентным способом при соответствующем выборе матрицы Q_0 .

Матрицу N^+ можно вычислить для случаев равноточных или неравноточных измерений по формуле [2]:

$$N^+ = Q = A^+ (A^+)^T. \quad (4)$$

Формулы для вычисления Q для обычных (не нуль-свободных) геодезических сетей хорошо известны [3; 4]:

$$Q_i = Q_{i-1} - Z_i^T Z_i / g_i; \quad (5)$$

$$Z_i^T = Q_{i-1} A_i^T; \quad (6)$$

$$g_i = \frac{1}{P_i} + A_i Z_i^T, \quad (7)$$

где i – номер измерения.

При подключении последнего n -го измерения

$$Q_{рек.} = Q_n. \quad (8)$$

При этом [3]

$$Q_0 = 10^m E. \quad (9)$$

Числовые примеры

Рассмотрим вычисление обратной матрицы весов Q для геодезического четырехугольника (рис. 1), не содержащего исходных пунктов.

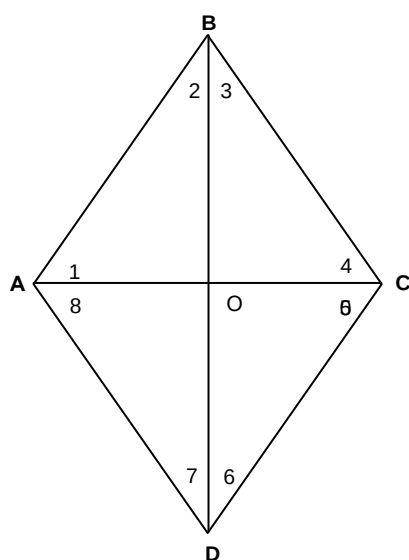


Рис. 1. Геодезический четырехугольник

Координаты пунктов геодезического четырехугольника представлены в таблице 1.

Таблица 1

Координаты пунктов геодезического четырехугольника

Название пункта	x , м	y , м	X , м	Y , м
A	1100	100	75	-517,5
B	1650	640	625	22,5
C	1250	1230	225	612,5
D	100	500	-925	117,5
Ср.	1025	617,5	0	0

В таблице 1 x, y – координаты пунктов; X, Y – отклонения от $X_{ср}, Y_{ср}$.

Найденная по формуле (2) матрица R представлена в таблице 2.

Таблица 2

Матрица R

1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1
-517,5	-75,0	22,5	-625,0	612,5	-225,0	-117,5	925,0
75,0	-517,5	625,0	22,5	225,0	612,5	-925,0	-117,5

Матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок для данного примера (см. геодезический четырехугольник безысходных пунктов, рис. 1) представлена в таблице 3.

Таблица 3

Матрица A

№ параметра	δX_A	δY_A	δX_B	δY_B	δX_C	δY_C	δX_D	δY_D
1	-8,1074	167,143	187,4819	-190,9538	-179,3745	23,8108	0	0
2	187,4819	-190,9538	-175,5596	58,9566	0	0	-11,9223	131,9972
3	0	0	-251,4347	-30,3841	239,5124	162,3813	11,9223	-131,9972
4	-179,3745	23,8108	239,5124	162,3813	-60,1379	-186,192	0	0
5	179,3745	-23,8108	0	0	-98,2204	-104,0347	-81,1541	127,8455
6	0	0	11,9223	-131,9972	-81,1541	127,8455	69,2318	4,1517
7	-71,1258	-177,8145	-11,9223	131,9972	0	0	83,0481	45,8173
8	-108,2487	201,6253	0	0	179,3745	-23,8108	-71,1258	-177,8145

Матрица коэффициентов нормальных уравнений $N = (A^T P A)$ дана в таблице 4.

Таблица 4

Матрица N

1,1634E + 05	-5,4880E + 04	-7,6550T + 04	-2,5910T + 04	-2,4790T + 04	1,7120T + 04	-1,5000T + 04	6,3670T + 04
-5,4880E + 04	1,3780E + 05	7,2680T + 04	-6,2780T + 04	7,0900T + 03	-2,7800T + 03	-2,4900T + 04	-7,2250T + 04
-7,6550E + 04	7,2680E + 04	1,8684T + 05	-2,7700T + 03	-1,0922T + 05	-7,9440T + 04	-1,0700T + 03	9,5200T + 03
-2,5910E + 04	-6,2780E + 04	-2,7700T + 03	1,0208T + 05	2,7920T + 04	-5,6590T + 04	7,6000T + 02	1,7290T + 04
-2,4790E + 04	7,0900E + 03	-1,0922T + 05	2,7920T + 04	1,4157T + 05	4,1390T + 04	-7,5500T + 03	-7,6400T + 04
1,7120E + 04	-2,7800E + 03	-7,9440T + 04	-5,6590T + 04	4,1390T + 04	8,9340T + 04	2,0920T + 04	-2,9970T + 04
-1,5000E + 04	-2,4900E + 04	-1,0700T + 03	7,6000T + 02	-7,5500T + 03	2,0920T + 04	2,3620T + 04	3,2200T + 03
6,3670E + 04	-7,2250E + 04	9,5200T + 03	1,7290T + 04	-7,6400T + 04	-2,9970T + 04	3,2200T + 03	8,4930T + 04

Матрица Q, полученная как известным, так и новым методом, разработанным В.И. Мицкевичем (2010 г.), представлена в таблице 5.

Таблица 5

Матрица Q

0,4526T - 5	0,2061T - 5	-0,1355T - 5	-0,0769T - 5	0,0203T - 5	-0,2366T - 5	-0,3374T - 5	0,1074T - 5
0,2061T - 5	0,3781T - 5	-0,0027T - 5	-0,1016T - 5	0,0968T - 5	-0,2024T - 5	-0,3002T - 5	-0,0741T - 5
-0,1355T - 5	-0,0027T - 5	0,1727T - 5	-0,0016T - 5	-0,1153T - 5	-0,0006T - 5	0,0781T - 5	0,0049T - 5
-0,0769T - 5	-0,1016T - 5	-0,0016T - 5	0,3033T - 5	0,1306T - 5	-0,2109T - 5	-0,0521T - 5	0,0093T - 5
0,0203T - 5	0,0968T - 5	-0,1153T - 5	0,1306T - 5	0,2382T - 5	-0,1301T - 5	-0,1431T - 5	-0,0973T - 5
-0,2366T - 5	-0,2024T - 5	-0,0006T - 5	-0,2109T - 5	-0,1301T - 5	0,4599T - 5	0,3673T - 5	-0,0466T - 5
-0,3374T - 5	-0,3002T - 5	0,0781T - 5	-0,0521T - 5	-0,1431T - 5	0,3673T - 5	0,4024T - 5	-0,0150T - 5
0,1074T - 5	-0,0741T - 5	0,0049T - 5	0,0093T - 5	-0,0973T - 5	-0,0466T - 5	-0,0150T - 5	0,1114T - 5

Используем метод В.И. Мицкевича для нивелирной сети, доказывая, что он универсален и может быть применен не только для обработки плановых сетей, как говорилось выше (см. матрицу Q , табл. 5), но и любых других геодезических сетей.

Рассмотрим нуль-свободную нивелирную сеть (рис. 2), не содержащую исходных пунктов.

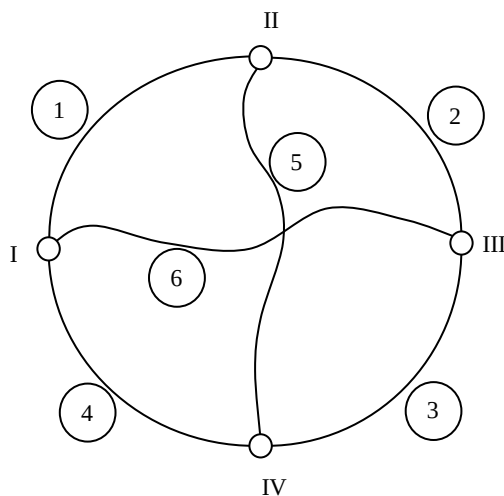


Рис. 2. Нивелирная сеть без исходных пунктов

Поскольку нет исходных пунктов, то число параметров $t = 4$ – количество определяемых пунктов. Матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок A составляется по известным правилам с учетом направления нивелирования, показываемого стрелкой. На рисунке 2 стрелок нет, и это правильно, потому что в дальнейшем мы будем выполнять предрасчет точности нивелирной сети в процессе ее проектирования. Направление нивелирования неизвестно, так как нивелирную сеть мы проектируем. В этом случае в строках матрицы A левый коэффициент, равный единице, запишем без минуса, а правый – с минусом.

В результате матрица A для нашего примера будет такой:

$$A_{6 \times 4} = \begin{array}{c|cccc} & I & II & III & IV \\ \hline 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 4 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 5 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 6 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{array}$$

Матрица Q_0 будет иметь вид [3]:

$$Q_0 = 10^m E = \begin{pmatrix} 100000000 & 0 & 0 & 0 \\ & 100000000 & 0 & 0 \\ & & 100000000 & 0 \\ & sim & & 100000000 \end{pmatrix}.$$

Поскольку $N = 6$ (количество измерений), то используя последовательно строки матрицы A , применим формулы (5) – (7) шесть раз, и по формуле (7) найдем [2]

$$g = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 2 \cdot 10^8 & 1,5 \cdot 10^8 & 1,33 \cdot 10^8 & 4 & 2 & 2 \\ \hline \end{array}$$

Подключая последнюю строку матрицы A (применяя шестой раз формулу (5)), получим

$$Q_{рек} = 10^7 \begin{pmatrix} 2,50 & 2,50 & 2,50 & 2,50 \\ & 2,50 & 2,50 & 2,50 \\ & & 2,50 & 2,50 \\ & sim & & 2,50 \end{pmatrix}.$$

При $P = E$ по формуле (3) вычислим A^+

$$A^+ = \begin{pmatrix} 0,25 & 0 & 0 & 0,25 & 0 & 0,25 \\ -0,25 & 0,25 & 0 & 0 & 0,25 & 0 \\ 0 & -0,25 & 0,25 & 0 & 0 & -0,25 \\ 0 & 0 & -0,25 & -0,25 & -0,25 & 0 \end{pmatrix}.$$

По формуле (4) найдем матрицу R^+ , близкую к $Q_{\text{мнк}}$.

Шестой метод позволяет находить матрицы A^+ и R^+ , используемые при оценке точности и уравнивании любых плановых, высотных или спутниковых геодезических сетей, и, так же как и метод А.Н. Тихонова, устойчив к возмущениям в элементах матриц P и A . Исследования показали, что изложенный метод является одним из наилучших по своей простоте, универсальности и надежности.

В заключение отметим, что этот метод, позволяющий вычислять матрицу Q при решении некорректных задач геодезии (например, при обработке нуль-свободных геодезических построений для любых геодезических сетей: плановых, высотных или спутниковых), требует соответствующей методики выбора показателя степени m , входящего в формулу (9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко, М.Д. Определение современных движений земной коры из повторных измерений / М.Д. Герасименко, Г.А. Шароглазова // Геодезия и картография. – 1985. – № 7. – С. 25 – 29.
2. Грищенко, Е.В. Универсальный алгоритм идентификации необходимых и избыточных измерений и его практические приложения / Е.В. Грищенко, В.И. Мицкевич // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2011. – № 3. – С. 64 – 68.
3. Маркузе, Ю.И. Уравнивание и оценка точности плановых геодезических сетей / Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1982. – 191 с.
4. Маркузе, Ю.И. Алгоритмы для уравнивания геодезических сетей на ЭВМ / Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1989. – 248 с.
5. Мицкевич, В.И. Математические методы и модели на ЭВМ: учеб.-метод. компл. / В.И. Мицкевич. – Новополоцк, 2007. – 184 с.

Поступила 29.03.2012

COMPARISON OF TWO METHODS ESTIMATE THE ACCURACY ZERO-FREE PLANNED GEODETIC NETWORK, NOT CONTAIN INGSTARTING POINT

G. GOLOVAN, I. SHEVELEV, V. YALTYHOV

The problems of obtaining the inverse matrix of weights used to evaluate the accuracy of the function of the measured and equation variables for the case when the geodetic network does not contain the source items. Such networks are called zero-free. Notes, that for the treatment of zero-free planned geodetic networks can be used as a well-known methods (proposed by Academician A.N. Tikhonov, and methods of using "pseudoinverse", and a method based on using the coordinates of all points of the geodetic network) as well as a new method proposed by prof. V.I. Mickevich. Purpose of the article – a comparison of one of the known methods of treatment of the zero-free geodetic networks with using a new algorithm of the recursive equalizations is widely used in geodesy through the work of prof. Y.I. Marcuse.

УДК 528.063

НОВЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ СИСТЕМ УСЛОВНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ КОРРЕЛАТНОМ СПОСОБЕ УРАВНИВАНИЯ

А.В. ГРИЩЕНКОВ, Е.В. ГРИЩЕНКОВ
(Полоцкий государственный университет)

Формула для вычисления главной псевдообратной матрицы коэффициентов условных уравнений при коррелятном способе уравнивания известна лишь для случая равноточных результатов измерений. В представленном нами исследовании она обобщена на случай неравноточных измерений, что делает метод решения систем условных уравнений универсальным в практическом применении. Зная псевдообратную матрицу коэффициентов условных уравнений, возможно обрабатывать системы зависимых уравнений, что по прежней методике давало деление на ноль при обращении матрицы коэффициентов нормальных уравнений коррелят. В результате разработан новый метод решения систем условных уравнений (зависимых или независимых), расширяющий возможности применения коррелятного способа уравнивания. В этом методе впервые используется специально разработанный нами алгоритм рекуррентного получения обратной весовой матрицы коррелят, без которого невозможна обработка систем зависимых условных уравнений.

В практике уравнивательных вычислений известны два классических способа уравнивания: параметрический и коррелятный. Для первого способа под руководством профессора В.И. Мицкевича разработан алгоритм получения псевдообратной матрицы коэффициентов параметрических уравнений поправок, используемый для уравнивания нуль-свободных геодезических сетей и опубликованный в [1]. В данном исследовании эта методика применения псевдообратных матриц обобщена на случай коррелятного способа уравнивания, что делает метод решения систем условных уравнений универсальным в практическом применении.

Главная псевдообратная матрица коэффициентов условных уравнений при коррелятном способе уравнивания для случая равноточных измерений вычисляется по формуле [2, с. 47]:

$$B^+ = B^T (BB^T)^{-1}. \quad (1)$$

Для неравноточных измерений, когда диагональная матрица весов $P \neq E$, существует матричное выражение:

$$B^+ = P^{\frac{1}{2}} B^T (BP^{-1}B^T)^{-1}, \quad (2)$$

$$R^+ = (B^+)^T B^+, \quad (3)$$

что справедливо для матрицы нормальных уравнений коррелят R для равноточных измерений. Вычисление $(BP^{-1}B^T)^{-1}$ проблематично, если система уравнений содержит зависимые условные уравнения и определитель матрицы $R = BP^{-1}B^T$ равен нулю. При этом для случая зависимых и независимых систем уравнений можно применить новую формулу:

$$B^+ = P^{-\frac{1}{2}} B^T Q_{рек}, \quad (4)$$

где $Q_{рек}$ – обратная матрица коэффициентов системы нормальных уравнений коррелят, найденная рекуррентным способом, при соответствующем выборе начальной матрицы Q_0 . Здесь $Q_{рек} = Q_N$, где N – номер последнего измерения.

Формулы для вычисления матрицы $Q_{рек}$ хорошо известны лишь для параметрического способа уравнивания [3; 4]. Для коррелятного способа нами получены следующие новые формулы:

- для i -того измерения (i -того столбца матрицы B) имеем

$$Q_i = Q_{i-1} - Z_i \cdot \frac{Z_i^T}{g_i}; \quad (5)$$

$$Z_i = Q_{i-1} \cdot B_i; \quad (6)$$

$$g_i = P_i + B_i^T \cdot Z_i. \quad (7)$$

Отметим, что матрица Q_0 , используемая при подключении первого столбца матрицы коэффициентов условных уравнений B_1 , для коррелятного способа уравнивания будет выбираться по тем же правилам, что и для параметрического способа, однако коэффициент C вычисляется по формуле:

$$C = \max \left| \sqrt{\frac{1}{P_i}} \cdot B_i \right|. \quad (8)$$

Вектор коррелят можно получить из выражения:

$$K = -R^+ W, \quad (9)$$

где W – вектор свободных членов условных уравнений.

Вектор поправок в измерения из уравнивания можно найти по известной формуле

$$V = P^{-1} B^T K. \quad (10)$$

Формулы (2) – (10) позволяют реализовать коррелятный способ уравнивания для всех возможных случаев, когда коэффициенты матрицы B будут независимыми или зависимыми.

Данный алгоритм реализован на ЭВМ в виде подпрограммы `qkor.for`, исходный текст которой занимает 62 строки. Подпрограмма `qkor.for` вырабатывает признак PR , характеризующий матрицу системы нормальных уравнений коррелят $B P^{-1} B^T$. Если $PR = 0$, то указанная выше матрица R не вырожденная, в противном случае $PR = 1$. В обоих случаях решение будет найдено без особенностей. Величина GR , используемая в основной программе, реализующей коррелятный способ уравнивания, вычисляется по формуле:

$$GR = \frac{Q_{рек. (1,1)}}{R^+ (1,1)}. \quad (11)$$

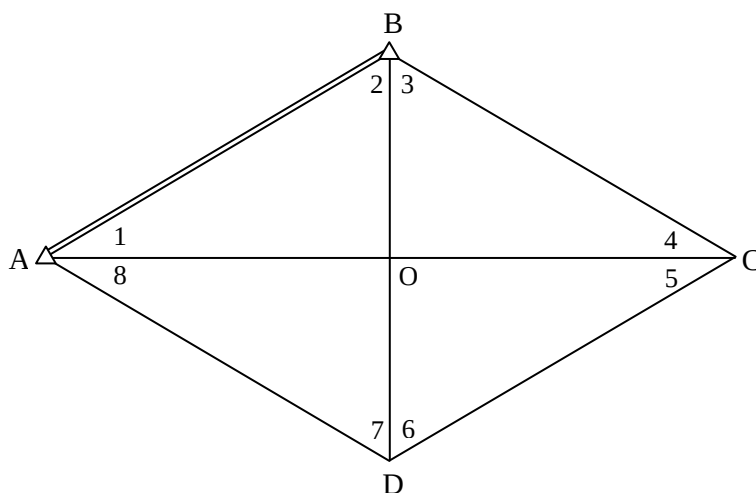
Если $GR > 10$, то $PR = 1$, так как матрица коэффициентов условных уравнений будет содержать зависимые строки.

В практике уравнивательных вычислений зависимые условные уравнения могут появляться не только из-за ошибок вычислителя при составлении условных уравнений, но и при коррелятно-параметрическом способе уравнивания, когда не удастся четко разделить эти уравнения на зависимые и независимые [5].

Построение универсального алгоритма уравнивания стало возможным благодаря применению новых матричных выражений (2) и (4) при последующем использовании равенств (5) – (10).

Числовые примеры

Пример 1. Применим новые формулы для уравнивания коррелятным способом геодезического четырехугольника, показанного на рисунке.



Геодезический четырехугольник

Таблица 1

Измеренные углы

Угол	Измерение
1	37°58'22"
2	39°18'30"
3	61°01'37"
4	41°41'41"
5	50°01'55"
6	27°14'40"
7	26°57'40"
8	75°45'05"

Матрица коэффициентов независимых условных уравнений приведена в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты условных уравнений и поправки в углы из уравнивания

№ п/п	Треугольник ADB	Треугольник ABC	Треугольник ADC	Полус в точке O	Веса измерений P	$v_P = E$	$v_P \neq E$
1	1	1	0	-1,2812	1	-8,6676	-19,0368
2	1	1	0	1,2214	2	12,2348	23,8066
3	0	1	0	-0,5537	3	-13,7840	-14,8175
4	0	1	0	1,1226	4	0,2168	0,0478
5	0	0	1	-0,8381	5	-1,3268	5,1432
6	0	0	1	1,9421	6	21,8941	16,6265
7	1	0	1	-1,9659	7	0,4462	5,7816
8	1	0	1	0,2539	8	18,9865	12,4487
W	-23"	10"	-40"	-81,5"			

Матрица коэффициентов нормальных уравнений коррелат для случая неравноточных измерений приведена в таблице 3.

Таблица 3

Матрица R

1,7679	1,5000	0,2679	-0,9196
1,5000	2,0833	0	-0,5744
0,2679	0	0,6345	-0,0930
-0,9196	-0,5744	-0,0930	4,1339

Главная псевдообратная матрица B^+ показана в таблице 4.

Таблица 4

Матрица B^+

0,3108	0,1964	-0,1630	-0,2172
0,6208	-0,0137	-0,2122	0,3403
-0,8361	0,8408	0,3326	-0,1390
-0,5341	0,6559	0,2421	0,1135
-0,4333	0,2764	0,8688	-0,1291
-0,1383	0,1544	0,7309	0,1989
0,2643	-0,2296	0,4632	-0,1424
0,4251	-0,2824	0,3903	0,0858

Матрицы $Q_{рек.}$ и $Q = R^+$ представлены в таблице 5.

Таблица 5

Матрицы $Q_{рек.}$ и Q (в данном примере совпадающие)

1,92383	-1,32267	-0,77889	0,22665
-1,32267	1,40854	0,54570	-0,08623
-0,77889	0,54570	1,89676	-0,05475
0,22665	-0,08623	-0,05475	0,27911

При этом программа qkor.for сообщила: $PR = 0$.

Поправки из уравнивания при $P \neq E$ приведены в таблице 2.

Несмотря на то, что нами применены выражения (2) – (8), результаты уравнивания геодезического четырехугольника оказались такими же, как и при обработке по формулам классического коррелятного способа уравнивания, так как строки матрицы B независимые. Если же строки матрицы B будут зависи-

мыми, то классический способ уравнивания даст деление на ноль при вычислении обратной матрицы нормальных уравнений коррелат и процесс вычислений окажется прерванным.

Пример 2. Рассмотрим обработку системы зависимых условных уравнений, приведенной в таблице 6.

Таблица 6

Коэффициенты условных уравнений и поправки в углы из уравнивания

№ п/п	Треугольник ADB	Треугольник ABC	Треугольник ADC	Треугольник BCD	Веса измерений P	$v_P \neq E$
1	1	1	0	0	1	1,69
2	1	1	0	0	2	0,84
3	0	1	0	1	3	-7,16
4	0	1	0	1	4	-5,37
5	0	0	1	1	5	10,65
6	0	0	1	1	6	8,88
7	1	0	1	0	7	10,42
8	1	0	1	0	8	9,55
W	-23"	10"	-40"	-7"		

Главная псевдообратная матрица B^+ для рассмотренного примера дана в таблице 7.

Таблица 7

Матрица B^+

0,3463	0,2701	-0,0648	-0,1409
0,2448	0,1910	-0,0458	-0,0996
-0,2666	0,3413	-0,1513	0,4566
-0,2309	0,2955	-0,1310	0,3954
0,0236	-0,1156	0,4914	0,3521
0,0216	-0,1055	0,4485	0,3214
0,3254	-0,2190	0,4898	-0,0546
0,3044	-0,2049	0,4582	-0,0511

Матрица $Q_{рек.}$ представлена в таблице 8.

Таблица 8

Матрица $Q_{рек.}$

25000000,50382	-25000000,15756	-24999999,64287	24999999,69575
-25000000,15756	25000000,42770	24999999,57811	-24999999,83663
-24999999,64287	24999999,57811	25000000,93886	-24999999,84016
24999999,69575	-24999999,83663	-24999999,84016	25000000,62746

Таким образом, по формулам (2) – (10) мы впервые получили поправки в углы из уравнивания при обработке зависимых условных уравнений, используя коррелатный способ уравнивания (см. последнюю колонку таблицы 6).

Матрица $Q = R^+$, вычисленная по формуле (3), приведена в таблице 9.

Таблица 9

Матрица Q

0,50382	-0,15756	0,35713	-0,30425
-0,15756	0,42770	-0,42189	0,16337
0,35713	-0,42189	0,93886	0,15984
-0,30425	0,16337	0,15984	0,62746

При этом программа qkog.for сообщила: $PR = 1$.

Заключение. Благодаря применению псевдообратной матрицы коэффициентов условных уравнений, вычисляемой по формуле (2), стало возможным обрабатывать системы зависимых условных уравнений. Для этого потребовалось применить формулы (5) – (7) для рекуррентного уравнивания геодезических сетей коррелятным способом. Очевидно, что при переходе от (2) к (4) необходимо использовать вспомогательную матрицу $Q_{рек.}$, вместо того чтобы вычислять $(BP^{-1}B^T)^{-1}$, как это было в классическом коррелятном способе уравнивания, дающем деление на ноль при зависимых строках матрицы B .

Теперь не требуется:

- 1) выбирать метод уравнивания в зависимости от характеристик матрицы $BP^{-1}B^T$;
- 2) применять метод сингулярного разложения матриц, метод регуляризации, предложенный академиком А.Н. Тихоновым, и другие методы решения вырожденных систем нормальных уравнений;
- 3) анализировать систему условных уравнений до ее решения. Если система нормальных уравнений вырожденная, то она будет решена как обычная с выработкой признака $PR = 1$;
- 4) производить приближения внутри программы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грищенко, Е.В. Универсальный алгоритм идентификации необходимых и избыточных измерений и его практические приложения / Е.В. Грищенко, В.И. Мицкевич // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2011. – № 3. – С. 64 – 68.
2. Воеводин, В.В. Матрицы и вычисления / В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
3. Маркузе, Ю.И. Уравнивание и оценка точности плановых геодезических сетей / Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1982. – 191 с.
4. Маркузе, Ю.И. Алгоритмы для уравнивания геодезических сетей на ЭВМ / Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1989. – 248 с.
5. Герасименко, М.Д. Единый алгоритм составления условных уравнений и его применение для уравнивания и оценки точности геодезических построений / М.Д. Герасименко // Труды НИИГАиК. – Новосибирск, 1975. – Т. 34. – С. 66 – 73.

Поступила 29.03.2012

A NEW METHOD FOR SOLVING SYSTEMS OF CONDITIONAL EQUATIONS FOR KORELLATNY WAY TO EQUALIZE

A. GRISHCHENKOV, E. GRISHCHENKOV

The formula for calculating the main pseudoinverse matrix of coefficients in the conditional equations for korrelatny equalization method is known only for the case of equally accurate results of measurements. In this article it is extended to the case are not equally accurate measurements, which makes the method for solving systems of equations of condition in the practical application of the universal. Knowing the pseudoinverse matrix of coefficients of the conditional equations, can handle the system of dependent equations, that the former method gave a divide by zero when applying the coefficient matrix of normal equations of correlate. As a result, developed a new method for solving systems of equations of condition (dependent or independent) that extends the capabilities of korrelatny method. In this method, first used a specially algorithm developed the authors obtain the recurrent weight matrix inverse correlate, without which it can not be processing system of dependent-conditional equations.

УДК 528.063

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НУЛЬ-СВОБОДНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Н.С. СЫРОВА

(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Геодезические сети, не содержащие исходных пунктов (нуль-свободные), часто используются на геодезическом производстве для определения деформаций сооружений и осадок реперов. Рассматриваются вопросы получения обратной весовой матрицы для этих сетей с целью дальнейшей оценки точности функции уравненных измеренных величин. Показаны различные способы, с помощью которых можно получить обратную весовую матрицу для нуль-свободных сетей.

Математическая обработка геодезических сетей, не содержащих исходных пунктов (нуль-свободных геодезических сетей), является актуальной задачей геодезического производства.

Целью данного исследования явилось получение обратной весовой матрицы для нуль-свободных геодезических сетей с целью дальнейшей оценки точности функции уравненных измеренных величин.

Получение обратной матрицы весов методом А.Н. Тихонова

Известно, что для геодезических сетей, не содержащих исходных пунктов, определитель матрицы системы нормальных уравнений при параметрическом способе уравнивания равен нулю, т.е. говорят, что матрица коэффициентов нормальных уравнений вырожденная. Существуют несколько методов получения обратной матрицы Q от вырожденной матрицы коэффициентов системы нормальных уравнений R . Если матрица системы нормальных уравнений особенная (вырожденная), то в MATLABе обратная матрица весов может быть получена так:

$$q = \text{pinv}(r), \quad (1)$$

где функция pinv в MATLABе всегда записывается прописными буквами, которые удобно использовать при записи имени как матрицы обратных весов Q , так и матрицы коэффициентов нормальных уравнений R .

Тогда можно записать

$$Q = \text{pinv}(R), \quad (2)$$

что неудобно использовать при записи с переключением CapsLock.

Если матрица R вырожденная, то формула (2) приведет к верному результату, а формула

$$Q = \text{inv}(R) \quad (3)$$

даст деление на ноль, где inv – функция обращения матриц.

Если использовать другие программные продукты (например, Excel), подпрограмму pinv можно не найти, и для того чтобы обращаться вырожденную матрицу R , необходимо использовать другие методы.

Например:

- 1) метод регуляризации, предложенный А.Н. Тихоновым;
- 2) метод Г.Г. Асташенкова (только для нивелирных и спутниковых сетей);
- 3) метод В.Н. Ганьшина, применяемый для нивелирных и спутниковых сетей;
- 4) метод В.И. Мицкевича, предназначенный для уравнивания любых геодезических сетей без исходных пунктов как плановых, нивелирных, так и спутниковых GNSS-построений.

Рассмотрим основные формулы метода А.Н. Тихонова [1]:

$$Q_{\alpha} = (R^2 + \alpha E)^{-1} R, \quad (4)$$

где Q_{α} – обратная весовая матрица, используемая для оценки точности функции измеренных и уравненных величин, размерностью t (по числу строк и столбцов квадратной матрицы), где t – число параметров; R_{ext} – матрица коэффициентов нормальных уравнений, вычисляемая по формуле:

$$R = A^T P A, \quad (5)$$

в которой $A_{N \times t}$ – матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок, вычисляемая для каждого из N измерений (для одного измерения в матрице A будет отведена одна строка), $P_{N \times N}$ – матрица весов измерений. Далее в формуле (4) α – параметр регуляризации (скаляр); E_{ext} – единичная матрица.

Формула (4) универсальна: если матрица R не особенная, можно принять $\alpha = 0$; если матрица R вырожденная, α необходимо искать особыми методами.

Один из таких методов разработал Ю.Г. Карпушин. Суть этого метода в следующем:

1) для некоторого вектора свободных членов y вычисляют вектор поправок в предварительные координаты пунктов размерностью $t \times 1$:

$$\delta x_\alpha = -(R^2 + \alpha E)^{-1} R y_{t \times 1}; \quad (6)$$

2) находят целевую функцию

$$\Phi |\delta - \Theta|, \quad (7)$$

в которой

$$\delta = \sqrt{\frac{T}{\delta x^\alpha \delta x^\alpha}}; \quad (8)$$

$$\Theta = \sqrt{\Delta B^T \Delta B}, \quad (9)$$

где $\Delta B_{t \times 1}$ – некоторый вектор, зависящий от y .

Задача нахождения α решается путем минимизации функции Φ методом приближений, начиная с $\alpha = 0,1$. Величину α отыскивают приближениями, уменьшая её в 10 раз.

Например:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0,1; & \Phi_1 |\delta_1 - \Theta_1|; \\ \alpha_2 &= 0,01; & \Phi_2 |\delta_2 - \Theta_2|; \\ \alpha_3 &= 0,001; & \Phi_3 |\delta_3 - \Theta_3|; \\ \alpha_4 &= 0,0001; & \Phi_4 |\delta_4 - \Theta_4|. \end{aligned}$$

При переходе от одного приближения к другому Φ должна уменьшаться. Приближения продолжают до тех пор, пока не произойдет увеличение Φ .

Метод А.Н. Тихонова позволяет вычислять Q_α для любых геодезических сетей.

Метод Г.Г. Асташенкова

Этим методом можно найти псевдообратную матрицу R^+ от матрицы коэффициентов нормальных уравнений R при параметрическом способе уравнивания. Метод предназначен для вычисления R^+ только для нивелирных и спутниковых GNSS-сетей.

Основная формула

$$Q = R^+ = (R + I^T I) - I^T I / t^2, \quad (10)$$

где $I = (1, 1, 1, \dots, 1)_{t \times 1}$ – вспомогательная матрица; t – число параметров.

Это наиболее простой метод получения псевдообратной матрицы для нивелирных сетей. При этом $R = A^T P A$ согласно формуле (5).

Метод В.Н. Ганьшина

В основе метода [2] лежит принцип нахождения средней плоскости относительно пунктов нивелирной сети, отметки которых вычисляются по соответствующим формулам.

Для нахождения расширенной псевдообратной матрицы F и матрицы Q используют формулы:

$$F = G(S^T P S)^{-1} S^T P; \quad (11)$$

$$Q = F P^{-1} F^T; \quad (12)$$

$$G_{t \times (t-1)} = \frac{1}{t} \cdot \begin{pmatrix} t-1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & t-1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & -1 & t-1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & -1 & -1 & \dots & t-1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & -1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где $G_{t \times (t-1)}$ – вспомогательная псевдообратная матрица, формируемая программой; $S_{N, (t-1)}$ – матрица A без последнего столбца для одного исходного пункта; $A_{N \times 1}$ – матрица коэффициентов уравнений поправок; $P_{N \times N}$ – диагональная матрица весов измерений.

Метод В.И. Мицкевича

Главная псевдообратная матрица при параметрическом способе уравнивания для случая равно-точных измерений вычисляется по формуле [3, с. 47]:

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T. \quad (14)$$

Для неравноточных измерений, когда диагональная матрица весов $P \neq E$, существует матричное выражение:

$$A^+ = (A^T P A)^{-1} A^T P^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

а псевдообратная матрица от матрицы R , найденная по (5), будет такой:

$$R^+ = A^+ (A^+)^T, \quad (16)$$

что справедливо и для равноточных измерений. Вычисление матрицы $(A^T P A)^{-1}$, входящей в (15), проблематично, если определитель матрицы $R = A^T P A$ равен нулю. Однако В.И. Мицкевичем в 2010 году получена новая формула:

$$A^+ = Q_{рек} A^T P^{\frac{1}{2}}, \quad (17)$$

где $Q_{рек}$ – матрица обратных весов, найденная рекуррентным способом при соответствующем выборе матрицы Q_0 .

Формулы для вычисления Q при неособенной матрице R хорошо известны [4; 5];

$$Q_i = Q_{i-1} - \frac{Z_i^T}{g_i} \cdot Z_i; \quad (18)$$

$$Z_i^T = Q_{i-1} \cdot A_i^T; \quad (19)$$

$$g_i = \frac{1}{P_i} + A_i Z_i^T, \quad (20)$$

где i – номер измерения.

При подключении последнего n -го измерения

$$Q_{рек} = Q_n. \quad (21)$$

Матрица $Q_{рек}$ должна быть вычислена с максимальным числом значащих цифр.

Матрица A^+ , вычисленная по формуле (17), будет иметь $S/2$ верных значащих цифр, где S – число разрядов в разрядной сетке чисел на ЭВМ (например, в MATLABe при $S = 16$).

Начальная матрица Q_0 может быть получена по следующей формуле [6]:

$$Q_0 = 10^m \cdot E, \quad (22)$$

предложенной Ю.И. Маркузе.

Степень m может быть найдена по эмпирическим формулам, разработанным В.И. Мицкевичем [8].

Окончательный вариант формул для вычисления степени m , внедренный в программный комплекс «Россия – Беларусь», имеет вид:

$$C = \max \left| \sqrt{P_i} A_i \right|; \quad (23)$$

$$m = \frac{S}{2} - \lg C, \quad (24)$$

где S – количество разрядов в сетке ЭВМ.

Формулы (23), (24) позволяют выбирать m автоматически.

Исследуем точность вычисления матрицы Q (анализируя ее первый диагональный элемент $Q(1,1)$) в зависимости от выбора m при дальнейшем использовании как метода Ю.И. Маркузе [5], так и нового метода.

Вычисление матрицы Q разными методами

<i>m</i>	Метод Ю.И. Маркузе	Метод В.И. Мицкевича	Метод В.И. Мицкевича
1	2	3	4
1	$0,89482974 \cdot 10^{-5}$	$0,89482632 \cdot 10^{-5}$	$0,20307902 \cdot 10^{-5}$
2	$0,89482973 \cdot 10^{-5}$	$0,89482938 \cdot 10^{-5}$	$0,20307939 \cdot 10^{-5}$
3	$0,89482971 \cdot 10^{-5}$	$0,89482969 \cdot 10^{-5}$	$0,20307943 \cdot 10^{-5}$
4	$0,89482971 \cdot 10^{-5}$	$0,89482972 \cdot 10^{-5}$	$0,20307939 \cdot 10^{-5}$
5	$0,89482973 \cdot 10^{-5}$	$0,89482980 \cdot 10^{-5}$	$0,20307900 \cdot 10^{-5}$
6	$0,89482952 \cdot 10^{-5}$	$0,89482869 \cdot 10^{-5}$	$0,20308327 \cdot 10^{-5}$
7	$0,89482791 \cdot 10^{-5}$	$0,89482784 \cdot 10^{-5}$	$0,20311111 \cdot 10^{-5}$
8	$0,89486969 \cdot 10^{-5}$	$0,89483112 \cdot 10^{-5}$	$0,20321287 \cdot 10^{-5}$
9	$0,89492830 \cdot 10^{-5}$	$0,89391073 \cdot 10^{-5}$	$0,19835263 \cdot 10^{-5}$
10	$0,89406367 \cdot 10^{-5}$	$0,89675895 \cdot 10^{-5}$	$0,24231995 \cdot 10^{-5}$
11	$0,87614053 \cdot 10^{-5}$	$0,85899143 \cdot 10^{-5}$	$0,74747950 \cdot 10^{-4}$

Для примера геодезического четырехугольника [9] см. таблицу: в колонке 1 – показатель степени *m*; в колонках 2, 3 применены методы Ю.И. Маркузе и В.И. Мицкевича для обычного геодезического четырехугольника с исходными пунктами; в колонке 4 – способ В.И. Мицкевича, когда в сети отсутствуют исходные пункты.

По данным таблицы видно, что при $m = 1 - 8$ величины $Q(1,1)$ близки между собой, поэтому формулы (23) – (24) можно использовать повсеместно, так как они дают величину *m*, при которой матрица Q всегда будет получена рекуррентным способом с наивысшей точностью.

В заключение отметим, что метод В.И. Мицкевича как наиболее простой и надежный можно рекомендовать для внедрения на геодезическом производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. О вариационном методе регуляризации при уравнивании свободных геодезических сетей / А.Н. Тихонов [и др.] // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1980. – № 1. – С. 45 – 53.
2. Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В.Н. Ганьшин [и др.]; под общ. ред. В.Н. Ганьшина. – М.: Недра, 1981. – 215 с.
3. Воеводин, В.В. Матрицы и вычисления / В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
4. Маркузе, Ю.И. Уравнивание и оценка точности плановых геодезических сетей / Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1982. – 191 с.
5. Маркузе, Ю.И. Алгоритмы для уравнивания геодезических сетей на ЭВМ / Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1989. – 248 с.
6. Маркузе, Ю.И. Основы уравнивательных вычислений: учеб. пособие для вузов / Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1990. – 240 с.
7. Двоенко, Г.М. О выборе начальной матрицы при рекуррентном способе уравнивания плановых геодезических сетей / Г.М. Двоенко // Геодезия и картография. – 1994. – № 8. – С. 9 – 11.
8. Мицкевич, В.И. Математические методы и модели на ЭВМ: учеб.-метод. компл. / В.И. Мицкевич. – Новополюцк, 2007. – 184 с.
9. Грищенко, Е.В. Универсальный алгоритм идентификации необходимых и избыточных измерений и его практические приложения / Е.В. Грищенко, В.И. Мицкевич // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2011. – № 3. – С. 64 – 68.

Поступила 29.03.2012

ESTIMATION OF THE ACCURACY OF ZERO-FREE GEODETIC NETWORKS WITH DIFFERENT WAYS

N. SYROVA

Geodetic networks that do not contain the entry points (zero-free) are often used in the geodetic manufacture for the determination of sediment deformation structures and frames. The problems of obtaining inverse weight matrix for these networks in order to further estimate the accuracy of equation of the measured values. Inverse weight matrix for the zero-free networks can be obtained in various ways.

УДК 528.063

РАВНОТОЧНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ НИВЕЛИРНЫЕ СЕТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ НА ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Д.В. УСОВ

(Полоцкий государственный университет)

Исследуются нивелирные сети, используемые для определения вертикальных деформаций инженерных сооружений. Получены равноточные нивелирные построения, в которых после обработки результатов измерений оценка точности определения осадочных реперов оказалась одинаковой. Рассматриваются различные по конфигурации равноточные нивелирные сети. Приведены условия для создания замкнутых, двухконтурных и универсальных равноточных нивелирных построений. Даны рекомендации по применению равноточных нивелирных сетей на геодезическом производстве.

При исследовании многочисленных, различных по своей схеме, нивелирных сетей было установлено, что при соблюдении определенных условий можно запроектировать и реализовать на местности геодезические равноточные построения различного типа:

- замкнутые равноточные нивелирные сети;
- двухконтурные равноточные нивелирные сети;
- универсально-равноточные нивелирные сети.

Под равноточной нивелирной сетью понимается такая геодезическая сеть, в которой средняя квадратическая погрешность высотного положения всех определяемых пунктов после уравнительных вычислений одинакова.

Поэтапно рассмотрим все типы равноточных нивелирных сетей.

1. Замкнутые равноточные нивелирные сети

При проектировании и построении замкнутых равноточных геодезических нивелирных сетей должны соблюдаться следующие условия (в порядке убывания их значимости):

- 1) нивелирная сеть должна быть замкнутой;
- 2) нивелирная сеть должна включаться в математическую обработку без исходных пунктов;
- 2) сеть необходимо уравнивать по методу наименьших квадратов (МНК);
- 3) количество связей на каждом пункте сети с другими пунктами должно быть одинаковым.

Ранее все исследования проводились при условии, что измерения для замкнутых равноточных нивелирных сетей (рис. 1) имеют один и тот же вес $P = E$ как для внутреннего замкнутого хода, так и для замыкающих по его контуру [1]. На геодезическом производстве данное условие сложно практически выполнить, так как расстояние между пунктами внутреннего хода и пунктами замыкающих сети разное.

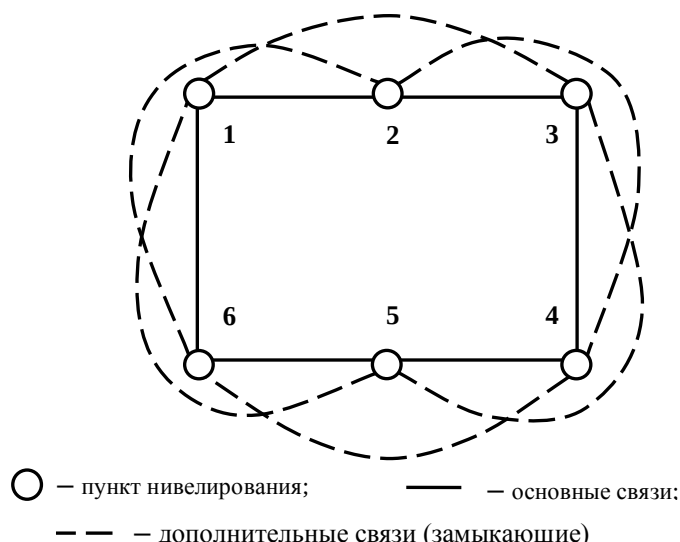


Рис. 1. Равноточный замкнутый нивелирный ход с замыкающими

Дальнейшие исследования показали, что можно получить равноточные нивелирные сети при неравноточных измерениях для внутреннего хода и замыкающих. Например, для сети, показанной на рисунке 1, вес измерений внутреннего хода $P = E$, а для замыкающих $P = 0,5E$. Если бы дополнительные измерения (замыкающие) объединяли три внутренних хода, то $P = 0,33E$, если четыре, то $P = 0,25E$, т.е. пропорционально расстоянию между пунктами.

Данное утверждение можно доказать на примере нивелирной сети, изображенной на рисунке 1, используя формулы (1) – (4) [2].

Точность высотного положения пункта i можно вычислить по следующим формулам:

$$m_{H_i} = \mu \sqrt{Q_{ii}}; \quad \mu = \sqrt{\frac{V^T P V}{r}}, \quad (1)$$

где m_{H_i} – средняя квадратическая погрешность отметки; V – поправки из уравнивания; r – число избыточных измерений; P – матрица весов измерений.

Вес измерений можно вычислить, используя следующие формулы:

$$P = \frac{1}{\sigma_h^2}; \quad P = \frac{C}{L}; \quad P = \frac{1}{j}, \quad (2)$$

где σ_h – стандарт измеренных превышений; L – длина хода в километрах; j – число станций нивелирования для конкретного превышения.

Диагональные элементы Q_{ii} в формуле (1) можно найти, используя матричное выражение:

$$Q = F P^{-1} F^T, \quad (3)$$

где $F = (A^T P A)^+ A^T P$.

Здесь F – расширенная псевдообратная матрица; A – матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок.

При проектировании нивелирных сетей вместо выражения (1) можно использовать формулу:

$$m_{H_i} = \sigma_h \sqrt{Q_{ii}}. \quad (4)$$

Численные значения диагональных элементов обратной матрицы весов Q для указанной нивелирной сети при условии, что $P = E$, одинаковы и равны 0,1806. Используя формулу (4), получим одинаковые погрешности положения пунктов для всей сети. Значения диагональных элементов обратной матрицы весов Q для нивелирной сети при условии, что вес измерений внутреннего хода $P = E$, а для замыкающих $P = 0,5E$, одинаковы и равны 0,2491 для всех Q_{ii} . Применяя формулу (4), получим одинаковые для всех пунктов нивелирной сети средние квадратические погрешности определения отметок m_{H_i} , значит, сеть равноточная при различных весах измерений [2].

Можно выделить следующие преимущества замкнутых равноточных сетей:

- 1) замкнутые равноточные сети с различным числом замыкающих в 1,5 – 2,0 раза точнее аналогичных неравноточных нивелирных сетей;
- 2) высотное положение всех пунктов определено с одинаковой точностью;
- 3) используя равноточные сети (например, на атомных электростанциях), можно выявить малые величины деформаций, которые находятся в пределах доверительного интервала погрешностей измерений, за меньшее число циклов наблюдений.

2. Двухконтурные равноточные нивелирные сети

По своей структуре такие сети состоят из двух контуров пунктов: внутреннего и внешнего. Число пунктов внешнего и внутреннего контура должно быть одинаковым, но могут быть и исключения из данного правила.

Приведем необходимые условия для построения двухконтурных равноточных нивелирных сетей:

- 1) нивелирная сеть должна содержать два контура;
- 2) количество примыкающих превышений (связей) к пунктам сети должно быть одинаковым для всех пунктов нивелирного построения;
- 3) пункты внешнего и внутреннего контура должны быть связаны между собой дополнительными связями;
- 4) сеть должна уравниваться как геодезическое построение без исходных пунктов;
- 5) сеть должна уравниваться по методу наименьших квадратов.

Продemonстрируем на рисунке 2 выявленные нами схемы двухконтурных по структуре равноточных нивелирных сетей, которые входят во множество равноточных нивелирных сетей установленного, под руководством профессора В.И. Мицкевича.

Нами было выполнено уравнивание изображенных на рисунке 2 нивелирных сетей и доказано, что при соблюдении всех вышеперечисленных условий данные геодезические построения являются равноточными. Двухконтурные равноточные нивелирные построения обладают всеми достоинствами замкнутых равноточных нивелирных сетей. По точности двухконтурная сеть точнее, чем внешний и внутренний контур в отдельности. Данные сети можно использовать, когда есть необходимость в одинаковой точности внешней и внутренней высотной разбивочной сети и требуется высокая точность измерений.

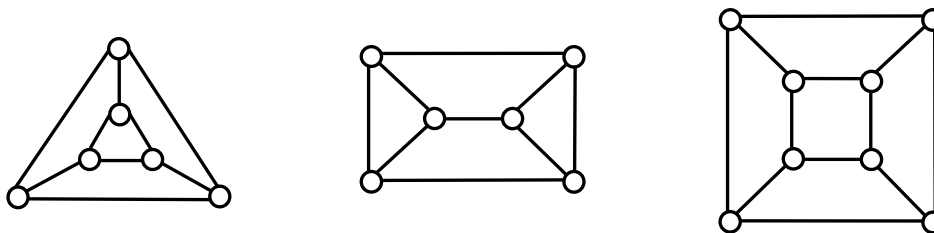


Рис. 2. Схемы двухконтурных нивелирных сетей

3. Универсально-равноточные нивелирные сети

Универсальность данных сетей заключается в том, что сеть равноточная не только для сетей без исходных пунктов (нуль-свободных), но и для свободных и несвободных нивелирных сетей. Данное свойство нами было получено при уравнивании нивелирных сетей, изображенных на рисунке 3.

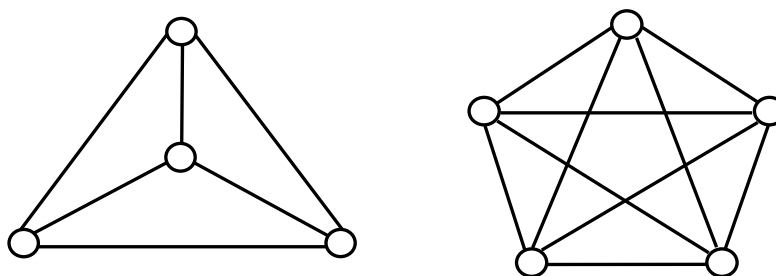


Рис. 3. Универсально-равноточные нивелирные сети

По результатам вычислений, выполненных для различных универсально-равноточных нивелирных сетей, сделаем следующие **выводы**:

1) построив сети определенной конфигурации, можно получить не только равноточные сети, но и универсально-равноточные, т.е. сети, в которых ошибка положения одинакова для всех пунктов при использовании сетей как свободное и несвободное построение;

2) при уравнивании нивелирных сетей по методу наименьших квадратов величина ошибки высотного положения для свободных сетей, опирающихся на один исходный пункт, всегда возрастает по сравнению с ошибками для нуль-свободных сетей (без исходных пунктов);

3) во всех случаях с возрастанием количества пунктов в сети и связей между ними средняя квадратическая ошибка положения пунктов уменьшается для любых несвободных, свободных и нуль-свободных нивелирных сетей;

4) если некоторые из условий построения равноточных нивелирных сетей не выполняются (например, при переходе от одной эпохи наблюдений к другой), можно получить квазиравноточные нивелирные сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Усов, Д.В. Методика построения равноточных нуль-свободных нивелирных и спутниковых геодезических сетей / Д.В. Усов, О.О. Усова, В.В. Ялтыхов // Земля Беларуси. – 2009. – № 1. – С. 38 – 40.
2. Мицкевич, В.И. О проектировании равноточных нивелирных сетей для целей определения осадок инженерных сооружений / В.И. Мицкевич, Д.В. Усов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 12. – С. 109 – 114.

Поступила 29.04.2012

EQUALLY ACCURATE'S GEODETIC LEVELING NETWORKS AND THEIR USE IN THE GEODETIC MANUFACTURER

D. USOV

Under the guidance of professor V.I. Micevich in the research of leveling networks used to determine the vertical deformation of engineering constructions have been obtained equally accurate leveling networks, in which, after processing the results of measurements accuracy of the estimation of sedimentary frame was the same. The different configurations of equally accurate leveling network. The conditions for the creation of closed, bypass and universal equally accurate leveling constructions. Recommendations on the use of equally accurate leveling networks in geodetic manufacturing.

УДК 528.063

О НОВОМ МЕТОДЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ И О ПЕРСПЕКТИВАХ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ УРАВНИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*д-р техн. наук, проф. В.И. МИЦКЕВИЧ,
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ
(Полоцкий государственный университет);
П.В. СУББОТЕНКО*

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматриваются вопросы теории уравнивания методами многостепенной и многокритериальной оптимизации. Приводятся формулы для реализации этих методов на ЭВМ. Отмечаются пути дальнейшего совершенствования многокритериальной оптимизации.

Как известно, существуют различные методы уравнивания:

- метод наименьших модулей МНМ ($n = 1$), предложенный Лапласом;
- метод наименьших квадратов МНК ($n = 2$), созданный и обоснованный Гауссом;
- метод L_p -оценок [1], объединяющий в себе предыдущие два метода и позволяющий применять другие методы уравнивания в соответствии с выбранной степенью n .

В результате варьирования степенью n можно получить: метод наименьших кубов ($n = 3$); метод наименьших полтора ($n = 1,5$) и другие на интервале $0,1 \leq n < 7,0$.

О других аналоговых методах уравнивания, не связанных со степенью n , мы упоминать не будем.

Известно, что для уравнивательных вычислений линейным параметрическим способом исходными являются три матрицы:

$A_{N \times t}$ – матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок, не связанная со степенью n ;

$P_{N \times N}$ – матрица весов некоррелированных измерений, зависящая от n ;

$L_{N \times 1}$ – вектор свободных членов параметрических уравнений поправок, не имеющий связи с n ,

где N – количество измерений (число уравнений); t – число параметров.

При этом сами алгоритмы уравнивания не должны быть связаны с содержимым матрицы A , т.е. какие бы ни были геодезические сети – плановые, высотные, фотограмметрические, спутниковые, свободные, несвободные, нуль-свободные, алгоритм обработки должен оставаться одним и тем же. Важно, чтобы матрица A была составлена по стандартным, известным правилам.

Отсюда следует очевидное: выбор метода уравнивания зависит от содержимого матрицы P .

При вычислении P до уравнивательных вычислений Гаусс предложил применять формулу:

$$P_i = \frac{c}{\sigma_i^2}, \quad (1)$$

где c – произвольная постоянная; σ – стандарт измерений.

Предлагаем эту формулу записать в следующем виде:

$$P_i = \frac{c}{\sigma_i^n}. \quad (2)$$

Учитывая, что обработка будет выполняться на ЭВМ, окончательно запишем

$$P_i = \frac{1}{\sigma_i^n}. \quad (3)$$

Зная универсальное выражение (3), можно, используя формулы решения систем уравнений, не зависящие от n , реализовать любой метод уравнивания, даже многостепенной, когда каждому измерению соответствует своя степень n_i .

Предлагаем следующие обозначения для матрицы P :

$$P_n = \left(\frac{1}{\sigma_i^n} \right) \cdot E \quad (4)$$

для метода L_p -оценок;

$$P_{n_i} = \left(\frac{1}{\sigma_i^{n_i}} \right) \cdot E \quad (5)$$

для многостепенного метода, где i – номер измерения.

Матрицы P_n и P_{n_i} будут диагональными для независимых измерений.

Мало предложить новый метод уравнивания, важно его обосновать. Обоснованным является только метод Гаусса, благодаря его известной теореме. Современные ученые по-разному трактуют эту теорему, приписывая мифические свойства МНК, якобы данный способ дает всегда наилучшую оценку точности по результатам уравнивания и др. В наших обозначениях следствием теоремы Гаусса является обязательное выполнение неравенства:

$$V_2^T P_2 V_2 \leq V_n^T P_n V_n, \quad (6)$$

где $V_2 = V_n$ при $n = 2$ – вектор поправок в измерения из уравнивания размером $N \times 1$ (продукт математической обработки).

Запишем основные формулы нового многостепенного метода уравнивания, для которого в зависимости от выборки измерений возможно выполнение неравенства:

$$V_{n_i}^T P_{n_i} V_{n_i} \leq V_2^T P_{n_i} V_2, \quad (7)$$

где $V_{n_i} = [(v_1)_{n1}, (v_2)_{n2}, \dots, (v_N)_{nN}]^T$, а V_2 – вектор поправок, найденный при $n = 2$.

Неравенство (7) не противоречит теореме Гаусса – Маркова, и МНК является частным случаем многостепенного метода.

Формулы, позволяющие реализовать новый метод уравнивания, имеют вид [2, с. 64]:

$$\hat{X} = X_0 + \delta X; \quad (8)$$

$$\delta X = -F_{diag} \left(\frac{1}{n_i - 1} \right) \cdot L; \quad (9)$$

$$F = (A^T C A)^{-1} A^T C; \quad (10)$$

$$C = C_i E;$$

$$C_i = P_{n_i} n_i (n_i - 1) |V_{n_i}|^{n_i - 2}; \quad (11)$$

$$V_{n_i} = A \delta x + L. \quad (12)$$

При использовании (11), когда $n_i < 2,0$, следует быть осторожным, так как при $V_{n_i} = 0,0$ произойдет деление на ноль. Поэтому к $|V_{n_i}|$ прибавляют малую величину.

Применение данных формул требует приближений, начиная с V_2 . В формуле (8) X_0 – вектор начальных координат пунктов.

Если по $\hat{X}$ уточняются матрицы A и L , то $X_0 = \hat{X}_{j-1}$, где j – номер приближения.

Этот метод не был бы создан, если бы не помощь В.А. Падве, подсказавшего идею численного поиска матрицы F с использованием формулы Ю.П. Андреева [3].

Формула (9) при $n = 2$ уникальна для использования при математической обработке измерений по установке магнитов на ускорителе заряженных частиц:

- 1) один раз по формуле (10) находим F ;
- 2) по датчикам измерений, расположенных на магнитах, определяем вектор измерений и находим L ;
- 3) не выполняя трудоемкого обращения матрицы $A^T P_2 A$, мгновенно вычисляем вектор δx , соответствующий L , и производим корректировку положения магнитов в автоматическом режиме.

Если обрабатывается геодезический полигон, а матрица A между эпохами неизменна (остается нетронутой геометрия сети), то формула (9) также полезна.

Выше мы упомянули о пользе формул (8) – (12) при использовании $n = 2$.

Укажем основные преимущества предложенного метода при применении n_i , индивидуального для каждого измерения.

Здесь вступает в силу другой, новый, многокритериальный метод (МК) уравнивания [2], в котором используется не одна целевая функция [1]:

$$\Phi_1(X) = \sum_{i=1}^N P_{n_i} |L_i(X)|^{n_i}, \quad (13)$$

а две [2] или даже три [4] критериальные функции:

$$\Phi_2(n_i, X) = \max(M); \quad (14)$$

$$\Phi_3(n_i, X) = \max(\mu M), \quad (15)$$

где M – ошибка положения пункта, вычисляемая по известной формуле с помощью матрицы обратных весов, найденной из выражения [5]:

$$Q = FP_{n_i}^{-1}F^T; \quad (16)$$

μ определяют из равенства:

$$\mu = \sqrt{\frac{V_{n_i}^T P_{n_i} V_{n_i}}{N - t}}. \quad (17)$$

Следует отметить, что для целевых функций Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 отыскивается минимум.

Одновременное использование трех целевых функций проблематично. Поэтому нами вместо Φ_2 и Φ_3 предложено использовать следующую объединенную целевую функцию [4]:

$$\Phi_2(n_i, X) = \max[(1 + \mu)M]. \quad (18)$$

Как минимизировать две целевые функции сразу, сказано в [2].

Мы научились стыковать две целевые функции с помощью специально разработанной методики посредством поиска индивидуальных степеней для каждого измерения путем приближений, начиная с $n_i = 2,0$ для всех i . Эта методика трудна в описании и требует большого объема вычислений. Можно разработать любую другую методику, но она может оказаться неэффективной.

Многокритериальный метод апробирован на тестовых примерах и с 2001 года внедрен в производство для уравнивания полигонометрических сетей по программе С.В. Маковского.

Исследования показали, что МК-метод имеет следующие преимущества:

1) для ошибок положения пунктов M всегда выполняется неравенство

$$\max M_{МК} \leq \max M_{МНК},$$

несмотря на то, что наибольшие M соответствуют разным пунктам для одного и того же объекта при обработке по МК и по МНК. В наилучшем случае оказалось, что $\max M_{МК}$ в 1,5 – 2,0 раза меньше, чем $\max M_{МНК}$;

2) метод МК находит $\hat{X}$ ближе к $X^{ист}$, чем МНК. В наилучшем случае оказалось, что $\hat{X}_{МК}$ ближе к $X^{ист}$, чем $\hat{X}_{МНК}$ в 70 % вариантов.

Последнее исследование выполняют на моделях следующим образом:

- 1) всем пунктам геодезической сети задаются координаты $X^{ист}$;
- 2) по $X^{ист}$ из решения обратных геодезических задач находят вектор $T^{ист}$ для вектора измерений T ;
- 3) по датчику псевдослучайных чисел генерируют ошибки и, вводя их в $T^{ист}$, находят $T^{изм}$;
- 4) вычисляют вектор $L = T^{ист} - T^{изм}$;
- 5) по формуле (8) находят из обработки $\hat{X}_{МК}$ и сравнивают его с $X^{ист}$.

Говоря о перспективах теории уравнивания, отметим основные задачи современного уравнивания:

1) научиться находить $(A^T C A)^+$ для любых геодезических сетей: с исходными или без исходных пунктов, с дефектом или без дефекта данных по единому алгоритму;

2) скорректировать используемую методику стыковки целевых функций с помощью рекуррентного способа вычисления матрицы Q , позволяющего изменять эту матрицу, удаляя или добавляя строки в матрице A [6];

3) продолжить исследования по поиску грубых ошибок в конкретных измерениях. Выполнять поиск не МК, а другими методами уравнивания.

Первые две задачи нами уже успешно решены, составлены универсальные программы, но алгоритмы пока еще не внедрены в производство.

Для уравнивания по МК-методу геодезической сети, содержащей 100 пунктов, на персональном компьютере по программе С.В. Маковского требуется до 10 минут машинного времени. По нашему мнению, лучше затратить это время, чем мгновенно получить результат уравнивания по МНК, являющийся, как правило, менее эффективным, чем после обработки измерений по МК-методу. Исследования показали, что новая программа дает решение в $N/2$ раза быстрее благодаря новым разработкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ялтыхов, В.В. Применение метода Lp-оценок в уравнивательных вычислениях / В.В. Ялтыхов, Н.О. Куприенко, П.М. Левданский. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 100 с.
2. Мицкевич, В.И. Основы многокритериального уравнивания геодезических сетей / В.И. Мицкевич, П.В. Субботенко, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 128 с.
3. Андреев, Ю.П. Вычисление оценок точности методом моделирования ошибок / Ю.П. Андреев // Геодезия и картография. – 1971. – № 11. – С. 20 – 24.
4. Левданский, П.М. Многокритериальная оптимизация с применением дополнительной целевой функции, зависящей от поправок в результаты измерений / П.М. Левданский, П.В. Субботенко, В.В. Ялтыхов // Геодезия, картография и геоинформационные системы: тр. междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 122 – 125.
5. Мицкевич, В.И. Математическая обработка геодезических построений методами нелинейного программирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Мицкевич. – СПб., 2004. – 29 с.
6. Маркузе, Ю.И. Алгоритмы для уравнивания геодезических сетей на ЭВМ / Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1989. – 248 с.

Поступила 29.03.2012

A NEW METHOD OF MEASURING MATHEMATICAL PROCESSING AND PROSPECTS FOR THE FURTHER DEVELOPMENT OF THE THEORY OF EQUALIZATION CALCULATIONS

V. MICKEVICH, V. YALTYHOV, P. SUBBOTENKO

The problems of the theory of equalization by using the methods of multistage and multi-criteria optimization. The formulas for the implementation of these methods on a computer. Observed on ways to further improve the multi-criteria optimization.

УДК 528.063

АЛГОРИТМЫ УРАВНИВАНИЯ И ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НЕЛИНЕЙНЫМИ МЕТОДАМИ

С.Г. ШНИТКО

(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены алгоритмы уравнивания и оценки точности геодезических сетей на основе нелинейных методов обработки измерений, предложенные З. Адамчевским, З.М. Юрианским, В.И. Мицкевичем. Приведены рекомендации по реализации этих методов на ЭВМ. Предложен новый алгоритм вычисления обратного веса функции.

В численных методах при реализации нелинейных алгоритмов необходимо вычислять частные производные целевой функции, для чего используют формулы, основанные на разностных отношениях.

При реализации на ЭВМ данных методов следует учитывать особенности машинной арифметики, например, явление катастрофической потери верных цифр, под которым понимают рост ошибки вследствие вычитания почти равных чисел [1]. Для создания устойчивого алгоритма необходим поиск величины шага численного дифференцирования, при котором разностные отношения дают наибольшее число верных цифр.

В большинстве реализаций нелинейных алгоритмов шаг численного дифференцирования задают в исходной информации и требуют, чтобы дифференцируемая функция была должным образом масштабирована. Часто шаг ищут итеративным путем, что приводит к увеличению времени вычислений. Данный подход является универсальным.

Эмпирический анализ накопления и распространения ошибок вычислений при обработке геодезических сетей позволил получить следующую универсальную формулу вычисления величины шага численного дифференцирования:

$$\delta = \sqrt{|X| + 10^{-\frac{m}{3}} / 10^{\frac{m}{3}}}, \quad (1)$$

где δ – величина шага; m – число разрядов представления чисел в ЭВМ; X – значение параметра, к которому задается приращение δ .

Ниже приведены пояснения по применению формулы (1) для различных нелинейных методов обработки геодезических сетей.

Алгоритм З. Адамчевского

Если уравнивается геодезическая сеть, развитая относительно методом спутниковой геодезии и содержащая более тысячи определяемых пунктов, то для ее обработки обычно применяют поисковые методы без составления матрицы нормальных уравнений $R = A^T P A$, тем более без вычисления элементов полной обратной матрицы весов $Q = R^{-1}$.

Получению фрагментов матрицы Q при уравнивании геодезических сетей на плоскости посвящены работы [2; 3]. Ниже этот алгоритм обобщен на случай уравнивания GNSS и нивелирных сетей. Для получения диагональных элементов матрицы Q , используемых при оценке точности уравненных координат или отметок пунктов сети, воспользуемся следующим порядком вычислений:

1) нивелирная сеть уравнивается один раз с последующим введением поправок в измерения так, чтобы $V^T P V$ равнялось нулю (поскольку поправки $V = 0$);

2) оцениваемый определяемый пункт i считается исходным, и к его уравненной отметке прибавляется малое приращение δ_i ;

3) нивелирная сеть с новым исходным пунктом уравнивается заново с получением поправок V_i в уравненные превышения. При этом

$$Q_{ii} = \frac{\delta_i^2}{V_i^T P V_i}, \quad (2)$$

где δ_i вычисляют по формуле (1). Параметром X является значение отметки H_i .

Для нахождения всех квадратичных коэффициентов матрицы Q необходимо нивелирную сеть уравнивать k раз (k – количество определяемых пунктов). Столько же раз требуется уравнивать и GNSS-сеть, поскольку $Q_{xx} = Q_{xy} = Q_{zz} = Q_{ii}$ [4].

Алгоритм 3.М. Юршанского

Метод 3.М. Юршанского при оценке точности геодезических сетей позволяет производить оценку точности функции F без ее предварительной линеаризации [5]. Для этого с помощью элементов обратной матрицы Q_{ji} 3.М. Юршанский предлагал определить переходные коэффициенты по формуле:

$$q_j = f(x_1 + Q_{j1}, x_2 + Q_{j2}, \dots, x_t + Q_{jt}) - f(x_1, x_2, \dots, x_t) \quad j = 1, 2, \dots, t. \quad (3)$$

Затем обратный вес функции получают из следующего выражения:

$$\frac{1}{P_F} = f(x_1 + q_1, x_2 + q_2, \dots, x_t + q_t) - f(x_1, x_2, \dots, x_t). \quad (4)$$

Достоинством этих формул является то, что не надо находить частные производные $\frac{\partial F}{\partial x_j}$. Это оправданно при сложном виде функций F , например, при уравнивании геодезических сетей на трехосном эллипсоиде. Недостаток формул состоит в ненормированности приращений в параметры x_i . Ориентируясь на наибольший по модулю элемент этой строки, 3.М. Юршанский предлагает подобрать подходящий масштабный коэффициент δ_j , который в одном случае должен уменьшить, а в другом увеличить приращения аргументов для более точного нахождения q_j .

Основываясь на формулах 3.М. Юршанского, предлагаем следующий новый алгоритм вычисления обратного веса функции:

1) вычисляют приращения δ_j и δ_q :

$$\delta_j = \frac{\delta}{|Q_j|_{\max}}; \quad \delta_q = \frac{\delta}{|q_j|_{\max}}, \quad (5)$$

где δ находят по формуле (1);

2) получают матрицу приращений R , элементы которой ($R_i = \delta_j Q_{ji}$):

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1t} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{t1} & R_{t2} & \dots & R_{tt} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

3) вычисляют масштабные коэффициенты по формуле:

$$q_j = f(x_1 + R_{j1}, x_2 + R_{j2}, \dots, x_t + R_{jt}) - f(x_1, x_2, \dots, x_t) \delta_j^{-1}. \quad (7)$$

Обратный вес функции находят из выражения

$$\frac{1}{P_F} = f(x_1 + R_{q1}, x_2 + R_{q2}, \dots, x_t + R_{qt}) - f(x_1, x_2, \dots, x_t) \delta_q^{-1}. \quad (8)$$

Метод релаксации, применяемый при решении пространственных засечек

Для решения пространственной засечки следует вычислить значения целевой функции в шести точках релаксации [6]:

$$P_{1,2}(X^{(j)} \pm \lambda, Y^{(j)}, Z^{(j)}); \quad P_{3,4}(X^{(j)}, Y^{(j)} \pm \lambda, Z^{(j)}); \quad P_{5,6}(X^{(j)}, Y^{(j)}, Z^{(j)} \pm \lambda).$$

Масштабный коэффициент t находят по формуле [6]:

$$t = \frac{\|\nabla \Phi(X, Y, Z)\|_{X,Y}}{\left| \frac{\partial \Phi(X, Y, Z)}{\partial Z} \right|}, \quad (9)$$

где в числителе – норма составляющей градиента целевой функции в плане; в знаменателе – модуль частной производной целевой функции по высоте.

Частные производные находим по известной формуле:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X} = \frac{1}{12\delta} -\Phi_{2\delta} + 8\Phi_{\delta} - 8\Phi_{-\delta} + \Phi_{-2\delta}, \quad (10)$$

где δ – шаг для численного дифференцирования, который также предлагаем вычислять по универсальной формуле (1) [4].

Заключение. Приведенные формулы могут оказаться весьма эффективными при решении любых систем нелинейных уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Численные методы и математическое обеспечение / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш; пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 575 с.
2. Макаров, Г.В. Оценка точности при поисковых методах уравнивания / Г.В. Макаров, В.В. Афанасьев, Б.В. Афанасьев // Геодезия и картография. – 1981. – № 11. – С. 20 – 22.
3. Adamczewski, Z. Nieliniowe analiza dokadnoscisieci geodezyjny / Z. Adamczewski // Geodezyja i kartografia (PRL). – 1971. – № 3. – S. 209 – 223.
4. Мицкевич, В.И. Скоростной алгоритм оценки точности обширных GPS-построений / В.И. Мицкевич, С.Г. Шнитко, В.В. Ялтыхов // Земля Беларуси. – 2004. – № 2. – С. 27.
5. Юршанский, З.М. Уравнивание и оценка точности последовательными приближениями методом конечных приращений аргументов начальных уравнений / З.М. Юршанский // Межвуз. сб. науч. тр. – Геодезия. – Новосибирск: НИСИ, 1977. – Т. I(41). – С. 137 – 157.
6. Мицкевич, В.И. Общий алгоритм вычисления пространственных засечек на ЭВМ методом релаксации / В.И. Мицкевич // Геодезия и картография. – 1978. – № 2. – С. 25 – 28.

Поступила 29.03.2012

ALGORITHMS OF EQUALIZATION AND ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF GEODETIC NETWORKS BY NON-LINEAR METHODS

S. SHNITKO

Algorithms of equalization and assessment of the accuracy of geodetic networks based on nonlinear processing methods of measurement proposed by Z. Adamchevskiy, Z.M. Yurshanskiy, V.I. Mickevich are considered. The recommendations for the implementation of these methods on a computer.

УДК 528.235

КОЭФФИЦИЕНТЫ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ В ПРОЕКЦИИ РУССИЛЯ

д-р техн. наук, проф. В.П. ПОДШИВАЛОВ
 (Белорусский национальный технический университет, Минск);
канд. техн. наук АКРЕШ МОХАММЕД САБРИ АЛИ
 (Ливия)

Приведены выражения для коэффициентов в обращенном ряде проекции Руссилья до 12 степени. Это позволяет применять проекцию для изображения значительных по размерам территорий с точностью, достаточной для решения научных и практических задач геодезии. Произведена оценка точности вычисления коэффициентов для зоны с разностями долгот в 21° и широт 20° на примере территории Алжира с широтой главной точки проекции, равной 28° . Показано, что вся территория Алжира может быть изображена в одной координатной зоне с долготой осевого меридиана в $1,5^\circ\text{E}$. Исследованы некоторые численные характеристики проекции для пунктов, расположенных в разных местах, произведены контрольные вычисления путем прямого и обратного перехода (геодезические – плоские, плоские – геодезические координаты). Приводятся результаты вычислений.

Сущность проекции Руссилья

Проекция Руссилья, так же как и другие конформные проекции, используется в геодезии по гармоническим уравнениям для ГИС; в литературе известно до восьмой степени разложения в ряд [1; 3; 4].

При разложении до двенадцатой степени

$$X_R = x_G + \frac{x_G^3}{12R_0^2} + \frac{x_G^5}{120R_0^4} + \frac{17x_G^7}{20160R_0^6} + \frac{31x_G^9}{362880R_0^8} + \frac{691x_G^{11}}{79833600R_0^{10}} + \dots,$$

$$X_R = x_G + \beta_3 x_G^3 + \beta_5 x_G^5 + \beta_7 x_G^7 + \beta_9 x_G^9 + \beta_{11} x_G^{11} + \dots,$$

$$\beta_3 = \frac{1}{12R_0^2}; \quad \beta_5 = \frac{1}{120R_0^4}; \quad \beta_7 = \frac{17}{20160R_0^6}; \quad \beta_9 = \frac{31}{362880R_0^8}; \quad \beta_{11} = \frac{691}{79833600R_0^{10}}, \quad (1)$$

где X_R – прямоугольные координаты в проекции Руссилья; x_G – прямоугольные координаты в проекции Гаусса; R_0 – средний радиус кривизны Земли для средней точки проекции; β_j – численные коэффициенты.

Из уравнений (1) видно, что прямоугольные координаты проекции Руссилья можно выразить в функции прямоугольных координат проекции Гаусса через аналитические функции:

$$\left. \begin{aligned} (X_R + iY_R) &= f(x_G + iy_G); \\ (X_R + iY_R) &= f(q + il). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для получения общих коэффициентов проекции Руссилья в виде гармонических уравнений используем выражения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= X - X_0 = C_1 \Delta q - C_2 \Delta q^2 - C_3 \Delta q^3 + C_4 \Delta q^4 + C_5 \Delta q^5 - C_6 \Delta q^6 + \dots, \\ X_m &= b_1 \Delta q + b_2 \Delta q^2 + b_3 \Delta q^3 + b_4 \Delta q^4 + b_5 \Delta q^5 + b_6 \Delta q^6 + \dots, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\Delta X = C_1 \Delta q - C_2 \Delta q^2 - C_3 \Delta q^3 + C_4 \Delta q^4 + C_5 \Delta q^5 + \dots + C_{12} \Delta q^{12},$$

$$\Delta X^3 = (C_1 \Delta q - C_2 \Delta q^2 - C_3 \Delta q^3 + C_4 \Delta q^4 + C_5 \Delta q^5 + \dots + C_{12} \Delta q^{12})^3,$$

$$\Delta X^5 = (C_1 \Delta q - C_2 \Delta q^2 - C_3 \Delta q^3 + C_4 \Delta q^4 + C_5 \Delta q^5 + \dots + C_{12} \Delta q^{12})^5,$$

$$\Delta X^7 = (C_1 \Delta q - C_2 \Delta q^2 - C_3 \Delta q^3 + C_4 \Delta q^4 + C_5 \Delta q^5 + \dots + C_{12} \Delta q^{12})^7,$$

$$\Delta X^9 = (C_1 \Delta q - C_2 \Delta q^2 - C_3 \Delta q^3 + C_4 \Delta q^4 + C_5 \Delta q^5 + \dots + C_{12} \Delta q^{12})^9,$$

$$\Delta X^{11} = (C_1 \Delta q - C_2 \Delta q^2 - C_3 \Delta q^3 + C_4 \Delta q^4 + C_5 \Delta q^5 + \dots + C_{12} \Delta q^{12})^{11}.$$

Члены разложений выше 12-й степени не учитываются.

Из условия уравнения (2) получим основные прямые коэффициенты в проекции Руссилья:

$$b_1 \Delta q + b_2 \Delta q^2 + b_3 \Delta q^3 + b_4 \Delta q^4 + b_5 \Delta q^5 + \dots + b_{12} \Delta q^{12} = x_G + \beta_3 x_G^3 + \beta_5 x_G^5 + \beta_7 x_G^7 + \dots + \beta_{11} x_G^{11},$$

$$x_G = \Delta X.$$

После сравнения получим соотношения коэффициентов до двенадцатой степени:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= C_1, \\ b_2 &= C_2, \\ b_3 &= \beta_3 C_1^3 - C_3 b_3, \\ b_4 &= C_4 - 3\beta_3 C_1^2 C_2, \\ b_5 &= C_5 + 3\beta_3 (C_1 C_2^2 - C_1^2 C_3) + \beta_5 C_1^5, \\ b_6 &= -C_6 + \beta_3 (3C_1^2 C_4 + 6C_1 C_2 C_3 - C_2^3) + 5\beta_5 C_1^4 C_2, \\ b_7 &= -C_7 + \beta_3 (3C_1^2 C_5 - 6C_1 C_2 C_4 + C_2^3 C_3) + \beta_5 (10C_1^3 - 5C_1^4 C_3) + \beta_7 C_1^7, \\ b_8 &= C_8 + \beta_3 (3C_2^2 C_4 - 3C_1^2 C_6 - 6C_1 C_2 C_5 - 6C_1 C_3 C_4 - 3C_2^3 C_3) + \beta_5 (10C_1^4 - 10C_1^2 C_2^3 + 20C_3^1 C_2 C_3) - 7\beta_7 C_1^6 C_2, \\ b_9 &= C_9 + \beta_5 (6C_1 C_2 C_6 - 3C_1^2 C_7 - 6C_1 C_3 C_5 + 3C_1 C_4^2 + 3C_2^2 C_5 + 6C_2 C_3 C_4 + C_3^3) + \\ &\quad + 5\beta_5 (C_1^4 C_5 - 4C_1^3 C_2 C_4 + 2C_1^3 C_3^2 - 6C_1^2 C_2^2 C_3 + C_1 C_4^3) - 7\beta_7 (3C_1^5 C_4^2 - C_1^6 C_3) + \beta_9 C_1^9, \\ b_{10} &= -C_{10} + 3\beta_3 (C_1^2 C_8 + 2C_1 C_2 C_7 + 2C_1 C_3 C_6 + 2C_1 C_4 C_5 + 2C_2 C_3 C_5 - C_2^2 C_6 - C_2 C_4^2 + C_3^2 C_4) + \\ &\quad + \beta_5 (30C_1^2 C_2^2 C_4 - 5C_1^4 C_6 - 20C_1^3 C_2 C_5 - 20C_1^3 C_3 C_4 - 30C_1^2 C_2 C_3^2 - C_2^5 - 20C_1 C_2^3 C_3 C) + \\ &\quad + 7\beta_7 (C_1^6 C_4 - 5C_1^4 C_2^3 + 6C_1^5 C_2 C_3) - 9\beta_9 C_1^8 C_2, \\ b_{11} &= -C_{11} + 3\beta_3 (C_1^2 C_9 - 2C_1 C_2 C_8 + 2C_1 C_3 C_7 - 2C_1 C_4 C_6 - 2C_2 C_3 C_6 - 2C_2 C_4 C_5 + C_1 C_5^2) - \\ &\quad - C_2^2 C_7 - C C_3^2 C_5 - C_3 C_4^2) + \beta_5 (20C_1^3 C_2 C_6 - 5C_1^4 C_7 - 20C_1^3 C_3 C_5 + 10C_1^3 C_4^2 C_4 + \\ &\quad + 30C_1^2 C_2^2 C_5 + 60C_1^2 C_2 C_3 C_4 - 10C_1^2 C_3^3 - 20C_1 C_2^3 C_4 + 30C_1 C_2^2 C_3^2 - C_2^4 C_3) - \\ &\quad + 7\beta_7 (C_1^6 C_5 - 6C_1^5 C_5 C_2 C_4 + 3C_1^5 C_3^2 - 15C_1^4 C_2^2 C_3 + 5C_1^3 C_2^4) + 9\beta_9 (4C_1^7 C_2^2 - C_1^8 C_3) + C_{11} C_1^{11}, \\ b_{12} &= C_{12} + \beta_3 (3C_2^2 C_8 - 6C_1 C_2 C_9 - 6C_1 C_3 C_8 - 6C_1 C_4 C_7 - 6C_1 C_5 C_6 - 6C_2 C_3 C_7 + 6C_2 C_4 C_6 - 6C_3 C_4 C_5 - \\ &\quad - 3C_1^2 C_{10} - 3C_2 C_5^2 - 3C_3^2 C_6 + C_4^3) - \beta_5 (20C_1^3 C_2 C_7 + 20C_1^3 C_3 C_6 + 20C_1^3 C_4 C_5 - 30C_1^2 C_2^2 C_6 + \\ &\quad + 60C_1^2 C_2 C_3 C_5 - 60C_1 C_2^2 C_3 C_4 - 30C_1^2 C_2 C_4^2 + 30C_1^2 C_3^2 C_4 - 20C_1 C_2^3 C_5 + 20C_1 C_2 C_3^3 + \\ &\quad + 5C_1^4 C_8 - 10C_2^3 C_3^2 + 5C_2^4 C_4) - 7\beta_7 (20C_1^3 C_1^3 C_3 - 6C_1^5 C_2 C_5 - 6C_1^5 C_3 C_4 + 15C_1^4 C_2^2 C_4 - 15C_1^4 C_2 C_3^2 - \\ &\quad - 3C_1^2 C_2^5 - C_1^6 C_6) - 9\beta_9 (C_1^8 C_4 - 7C_1^6 C_2^3 + 8C_1^7 C_2 C_3) - 11\beta_{11} C_1^{10} C_2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $b_{1,2,\dots}$ – коэффициенты проекции Руссилья; $C_{1,2,\dots}$ – прямые коэффициенты проекции Гаусса.

Коэффициенты для цилиндрической (Гаусса, UTM) проекции до 12-й степени включительно нами даны в работе [1].

Приведем их выражения:

$$\left. \begin{aligned}
 C_1 &= \frac{m_0 \cdot c \cdot \cos B_0}{V}, \\
 C_2 &= -\frac{C_1 \cdot \sin B_0}{2}, \\
 C_3 &= \frac{C_1 \cdot \cos^2 B_0}{6} (\tan^2 B_0 - V^2), \\
 C_4 &= \frac{C_1}{24} \sin B_0 \cos^2 B_0 (5 - \tan^2 B_0 + 9\eta^2 + 4\eta^4), \\
 C_5 &= \frac{C_1}{120} \cos^4 B_0 \left(5 + 14\eta^2 - 18 \tan^2 B_0 - 58\eta^2 \tan^2 B_0 + 13\eta^4 - 73\eta^4 \tan^2 B_0 + \right. \\
 &\quad \left. + \tan^4 B_0 + 4\eta^6 - 28\eta^6 \tan^2 B_0 \right), \\
 C_6 &= \frac{C_1 \sin B_0 \cos^4 B_0}{720} \left(58 \tan^2 B_0 + 330\eta^2 \tan^2 B_0 + 743\eta^4 \tan^2 B_0 - 61 - \right. \\
 &\quad \left. - 270\eta^2 - \tan^4 B_0 - 463\eta^4 \right), \\
 C_7 &= \frac{C_1 \cos^6 B_0}{5040} \left(479 \tan^2 B_0 - 61 - 331\eta^2 + 3298\eta^2 \tan^2 B_0 - 179 \tan^4 B_0 + \right. \\
 &\quad \left. + 1771\eta^2 \tan^4 B_0 + \tan^6 B_0 - 733\eta^4 + 9006\eta^4 \tan^2 B_0 - 6521\eta^4 \tan^4 B_0 \right), \\
 C_8 &= \frac{C_1 \sin B_0 \cos^6 B_0}{40320} \left(1385 + 10899\eta^2 + 543 \tan^4 B_0 - 32802\eta^2 \tan^2 B_0 + \right. \\
 &\quad \left. + 9219\eta^2 \tan^4 B_0 - 3111 \tan^2 B_0 - \tan^6 B_0 + 35319\eta^4 - \right. \\
 &\quad \left. - 134010\eta^4 \tan^2 B_0 + 52731\eta^4 \tan^4 B_0 \right), \\
 C_9 &= \frac{C_1}{362880} \cos^8 B_0 \left(19028 \tan^2 B_0 - 1385 - 12284\eta^2 - \tan^8 B_0 + \right. \\
 &\quad \left. + 214140\eta^2 \tan^2 B_0 + 1636 \tan^6 B_0 + 47188\eta^2 \tan^6 B_0 - \right. \\
 &\quad \left. - 18270 \tan^4 B_0 - 290868\eta^2 \tan^4 B_0 \right), \\
 C_{10} &= \frac{C_1 \sin B_0 \cos^8 B_0}{3628800} \left(50521 + 612540\eta^2 - 3277980\eta^2 \tan^2 B_0 - 206276 \tan^2 B_0 + \right. \\
 &\quad \left. + 101166 \tan^4 B_0 + 2402100\eta^2 \tan^4 B_0 - 4916 \tan^8 B_0 - \right. \\
 &\quad \left. - 239220\eta^2 \tan^6 B_0 + \tan^8 B_0 \right), \\
 C_{11} &= \frac{C_1 \cos^{10} B_0}{39916800} \left(1073517 \tan^2 B_0 - 50521 - 1949762 \tan^4 B_0 + \tan^{10} B_0 - \right. \\
 &\quad \left. - 14757 \tan^8 B_0 + 540242 \tan^8 B_0 - 17594876 \tan^8 B_0 - \right. \\
 &\quad \left. - 43255806\eta^2 \tan^4 B_0 - 663061\eta^2 + 18928316\eta^2 \tan^8 B_0 \right. \\
 &\quad \left. - 1205941\eta^2 \tan^8 B_0 \right), \\
 C_{12} &= \frac{C_1 \sin B_0 \cos^{10} B_0}{479001600} \left(2702765 - 17460701 \tan^2 B_0 - 189410408\eta^2 \tan^2 B_0 - \right. \\
 &\quad \left. - \tan^{10} B_0 + 16889786 \tan^4 B_0 + 11272037\eta^2 + \right. \\
 &\quad \left. + 517812174\eta^2 \tan^4 B_0 + 52828909 \tan^8 B_0 - \right. \\
 &\quad \left. - 143578274 \tan^6 B_0 + 41248981\eta^2 \tan^8 B_0 - \right. \\
 &\quad \left. - 285183772\eta^2 \tan^6 B_0 \right).
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

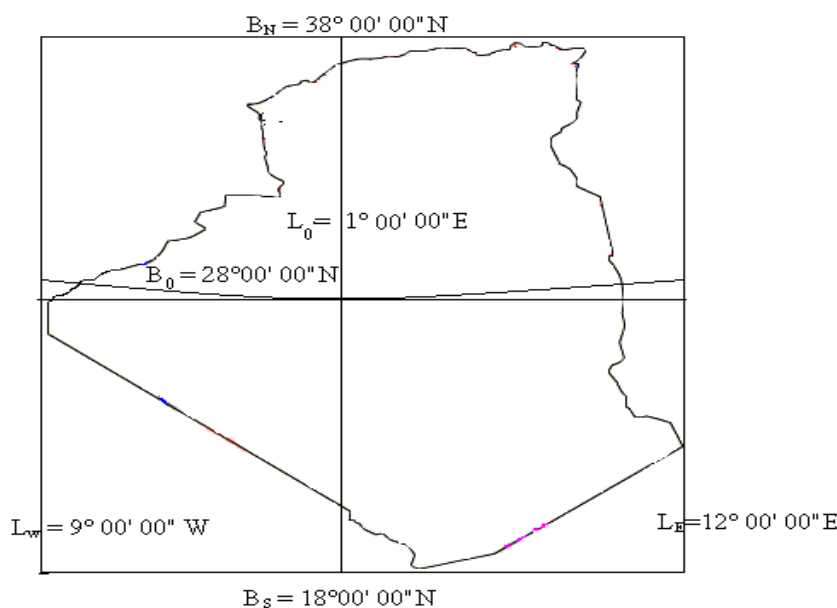
В коэффициентах C_6 отброшен член с множителем η^6 , а в коэффициентах $C_7 - C_{12}$ с множителем η^4 . Заметим, что выражения для коэффициентов до восьмого включительно известны [1; 3; 4 и др.].

Применяя полученные значения коэффициентов в выражениях для вычисления координат, можно проектировать на плоскость в проекции Руссилья территории стран, размеры которых ограничены разностью изометрических широт и долгот до 20° . При этом обеспечивается точность вычисления координат до 1 мм. В качестве апробации работы предлагаемых формул возьмем территорию Алжира.

Алжирская Народная Демократическая Республика находится в Северной Африке, в западной части Средиземноморского бассейна. Алжир граничит с Марокко на западе, Мавританией и Мали – на юго-западе, Нигером – на юго-востоке, Ливией и Тунисом – на востоке. Алжир – второе по величине африканское государство ($2,381,740 \text{ км}^2$) и одиннадцатое в мире, большая часть площади которого лежит в пустыне Сахара; столица – город Алжир. Географические координаты для граничных точек границы Алжира имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} B_S &= 18^\circ 58' 08'' \text{ N}; & B_N &= 36^\circ 56' 30'' \text{ N}; \\ L_W &= 8^\circ 39' 24'' \text{ W}; & L_E &= 11^\circ 59' 54'' \text{ E}. \end{aligned}$$

На рисунке показана территория Алжира и ее расположение в одной зоне с шириной 20° в направлении широты $B_S = 18^\circ 00' 00'' \text{ N}$, $B_N = 38^\circ 00' 00'' \text{ N}$ и 21° в направлении долготы $L_W = 9^\circ 00' 00'' \text{ W}$, $L_E = 12^\circ 00' 00'' \text{ E}$, с широтой главной точки проекции $B_0 = 28^\circ 00' 00.00'' \text{ N}$ и долготой центрального меридиана $L_0 = 1^\circ 30' 00'' \text{ E}$.



Алжир в одной зоне системы координат

В таблице показаны результаты вычисления координат в проекции Руссилья по геодезическим широтам и долготам и, наоборот, для проверки работы формул (обратные коэффициенты показаны в работе [1]).

Преобразование координат в проекции Руссилья

Геодезические координаты				
№	1	2	3	4
B	$38^\circ 00' 00.0000'' \text{ N}$	$18^\circ 00' 00.0000'' \text{ N}$	$36^\circ 00' 00.0000'' \text{ N}$	$34^\circ 00' 00.0000'' \text{ N}$
L	$9^\circ 00' 00.0000'' \text{ E}$	$9^\circ 00' 00.0000'' \text{ E}$	$9^\circ 00' 00.0000'' \text{ E}$	$9^\circ 00' 00.0000'' \text{ E}$
Преобразование в системе координат Руссилья $a = 6378137 \text{ м}$, $b = 6356752.314 \text{ м}$ $m_0 = 1.00000000$				
X м	4257002.2342	2028617.4367	4033433.4672	3810388.7832
Y м	929541.2511	1122169.4587	951738.1965	973245.0518
m'	1.01358651	1.01485432	1.01096076	1.00895444
γ	5.75125098	4.127688598	5.588747883	5.426551049
Преобразование координат Руссилья в геодезических координатах				
B	$38^\circ 00' 00.0000'' \text{ N}$	$18^\circ 00' 00.0000'' \text{ N}$	$36^\circ 00' 00.0000'' \text{ N}$	$34^\circ 00' 00.0000'' \text{ N}$
L	$9^\circ 00' 00.0000'' \text{ E}$	$9^\circ 00' 00.0000'' \text{ E}$	$9^\circ 00' 00.0000'' \text{ E}$	$9^\circ 00' 00.0000'' \text{ E}$

Из таблицы видно, что миллиметровая точность вычислений при преобразовании координат проекции Руссилья обеспечена.

Заключение. В итоге проведенного исследования для конформной геодезической проекции Русселя имеем следующие результаты:

- получены новые выражения коэффициентов разложения в ряды для проекции Русселя;
- обеспечены высокие результаты вычислений при размерах координатной зоны 20×21 градусов, что проверено применительно к территории Алжирской Народной Демократической Республики;
- все коэффициенты уравнений разложений для вычислений в проекции Русселя получаются по коэффициентам проекции Меркатора, что дает определенные преимущества в их практическом применении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акреш, М.С. Разработка научно-технических основ и технологии формирования систем координат для геоинформационных систем в условиях Ливии: дис. ... канд. техн. наук / Полоц. гос. ун-т; М.С. Акреш. – Новополоцк, 2010. – 131 с.
2. Акреш, М.С. Разработка закономерностей для обратных алгоритмов в проекциях Т. Меркатора и Русселя / М.С. Акреш // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 6. – С. 105 – 110.
3. Морозов, В.П. Курс сфероидической геодезии / В.П. Морозов. – М.: Недра, 1979. – 296 с.
4. Подшивалов, В.П. Теоретические основы формирования координатной среды для геоинформационных систем / В.П. Подшивалов. – Новополоцк: Изд. ПГУ, 1998. – 125 с.
5. Подшивалов, В.П. Общий алгоритм вычислений в геодезических проекциях / В.П. Подшивалов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Прикладные науки. – 1995. – Т. 1. – С. 66 – 74.
6. Akresh, M.S. New method in map projection indirect coefficients / M.S. Akresh // Proceedings of 12th AGILE international conference on geographic information science and ISPRS Hannover workshop 2009 High-Resolution Earth imaging for geospatial information, 2nd – 5th June, 2009. – Hannover of Germany, 2009. – first paper in CD [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.agile-online.org>.
7. Padshyvalau, U. Principles of design of projections for geographical information technologies / U. Padshyvalau, A. Matkin, M. Rymasheuskaja // Proceedings of the 10th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science: Scan GIS 2005. – Stockholm, 2005. – P. 137 – 145.
8. Padshyvalau, U. Automated design of coordinate system for long linear objects. / U. Padshyvalau, Y. Huryeu // Proceedings of the 11th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science, 5th – 7th September Scan-GIS-2007, As, Norway, 2007. – P. 147 – 155.

Поступила 18.01.2012

COEFFICIENTS IN MATHEMATICS SERIES FOR PROJECTIONS RUSSELL

**U. PADSHYVALAU,
AKRESH MOHAMMED SABRI ALI**

This paper presenting an expression for the direct coefficients in mathematics series for projections Russell to edges 12 degrees. This allows for the projection of calculate of significant size areas with sufficient accuracy to solve scientific and practical work of surveying. The estimation accuracy of the coefficients for computing the zone with the differences in the longitudes of 21° and latitude 20° with the large territory for example Algeria with the stander latitude of the projection of 28° N. It is shown Algeria can be represented in one coordinate zone with the longitude meridian at 1.5° E. Studied some numerical characteristics of the projection for the stations located in different places, made reference calculations by direct and reverse transition (the Rectangular coordinates – geodetic coordinates). The results of the calculations.

УДК 528.71

РАСЧЕТ РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ СКАНИРОВАНИИ АЭРОФОТОСНИМКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА
(Полоцкий государственный университет);

В.И. МЕДВЕДЕВ
(Завод эффективных промышленных конструкций, Минск)

Эллипсы погрешностей дают более правильное представление о средних квадратических погрешностях, поэтому полученные на их основе данные использовались для обоснования формул предрасчета точности определения координат точек местности и формул расчета разрешения при сканировании для обеспечения требуемой точности определения координат. Результаты вычислений по предложенным формулам подтвердили их справедливость. Показано, что округление рассчитанных масштабов съемки до 500 единиц не влияет на результаты расчета разрешения при сканировании. При низкой квалификации персонала может быть введен поправочный коэффициент в знаменателе формул расчета разрешения при сканировании, но не из-за погрешности сканирования, стереоскопического наведения, опознавания и измерения точек. Эти погрешности учтены в средних квадратических ошибках измерений координат на цифровых изображениях.

В соответствии с Инструкцией [1] величина разрешения при сканировании вычисляется по формулам:

1) величина элемента разрешения для обеспечения точности определения плановых координат P_s

$$P_s = \frac{M_k v_s}{2M_c}; \quad (1)$$

2) величина элемента разрешения для обеспечения точности определения высот P_z

$$P_z = \frac{fV_z}{2bM_c}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) коэффициент «2» учитывает потерю точности в ходе следующих процессов обработки [1]: сканирования, стереоскопического наведения, опознавания и измерения точек; M_k – знаменатель масштаба карты или плана; M_c – знаменатель масштаба обрабатываемых снимков; b – базис фотографирования на снимке; v_s – требуемая точность определения плановых координат на карте (средняя ошибка плановых координат). Разработчики инструкции [1] рекомендуют принять $v_s = 0,2$ мм; V_z – требуемая точность определения высот (средняя ошибка высот).

Как отмечено в работах [2; 3], эти формулы не обеспечивают требуемую точность для аэрофотоаппаратов с разными фокусными расстояниями f и не согласуются как с результатами вычислений по формулам предрасчета точности, так и с результатами вычислений по эллипсам погрешностей.

Для вывода формул расчета разрешения при сканировании удобнее пользоваться средними квадратическими ошибками (СКО). Преобразованные формулы (1) и (2) относительно СКО имеют соответственно вид [2; 3]:

$$m_{x,y} = \frac{2,5P_s M_c}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

$$m_z = \frac{2,5P_z b M_c}{f}, \quad (4)$$

где $m_{x,y}$ – СКО определения плановых координат X , Y ; m_z – СКО определения высот.

При проверке формул по эллипсам погрешностей в работах [2; 3] было показано, что в формуле (4) f необходимо поместить в числитель, а b – в знаменатель, тогда формула (4) принимает вид:

$$m_z = \frac{2,5P_z f M_c}{b}. \quad (5)$$

Но и после того, как b и f поменяли местами, было выяснено, что формулы расчета разрешения при сканировании дают значительное занижение точности как по отношению к данным, полученным по эллипсам погрешностей, так и по отношению к данным, полученным по формулам предрасчета точности.

В работе [3] были получены формулы предвычисления средних квадратических ошибок определения как плановых координат $m_{x,y}$, так и высот m_z на основе данных эллипсов погрешностей и рекомендовано пользоваться следующими формулами:

$$m_{x,y} = 0,84M_C\sigma, \quad (6)$$

$$m_z = 1,69 \frac{M_C f}{b} \sigma, \quad (7)$$

где σ – СКО измерений на снимке.

Для расчета в работах [2; 3] нами были выбраны следующие параметры: масштаб фотографирования $1:M_C - 1:10000$; масштаб создаваемого плана $1:M_K - 1:2000$; высота сечения рельефа $h - 0,5$ м; базис фотографирования на снимке $b = 92$ мм; при продольном перекрытии $P = 60$ % (продольное перекрытие $P = 80$ % применяется крайне редко, поэтому в этой работе такой случай рассматривать не будем); средняя ошибка на плане $v_S = 0,2$ мм; средняя ошибка на местности $V_S = 0,2M_K = 0,4$ м; средняя ошибка определения высот $V_Z = 0$; $2h = 0,4$ м. Значения фокусных расстояний аэрофотокамер $f = 88, 153, 213$ и 303 мм; разрешение при сканировании $P_S = P_Z = 14$ мкм; СКО измерений координат на снимке σ была принята равной половине величины разрешения при сканировании [4], следовательно

$$\sigma = \frac{P_S}{2} = \frac{P_Z}{2}. \quad (8)$$

Результаты расчета СКО определения плановых координат при продольном перекрытии 60 % приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения средних квадратических ошибок в метрах

По эллипсам ошибок	$m_{x,y} = 0,84M_C\sigma$ (6)	$m_{x,y} = \frac{2,5P_S M_C}{\sqrt{2}}$ (3)
0,059	0,059	0,247

Как видим, СКО, полученные на основании формулы (6), соответствуют данным, полученным по эллипсам погрешностей, а по формуле расчета разрешения при сканировании (3) СКО $m_{x,y}$ получились значительно больше.

Для того чтобы привести значения, полученные по формуле (3), к величинам, полученным по эллипсам погрешностей, рассчитаем поправочный коэффициент $k = \frac{m_{x,y}(3)}{m_{x,y}(6)} = 4,186$ и формула (3) примет вид:

$$m_{x,y} = 0,42P_S M_C. \quad (9)$$

Для обеспечения точности $m_{x,y} = 0,059$ м выбирали масштаб фотографирования в четыре раза крупнее или сканировали снимки с величиной разрешения в четыре раза меньше.

Вычисления по формуле (9) для принятых параметров дали СКО $m_{x,y} = 0,059$ м, т. е. определенная нами СКО совпала с данными эллипса погрешностей и формулы предрасчета точности (6).

Подобный анализ проведем и для формул: (7) – предрасчета точности определения высот; (5) – полученной на основании формулы расчета величины разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот.

Результаты расчетов СКО определения высот при продольном перекрытии $P = 60$ % приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения СКО определения высот в метрах

f , мм	88	153	213	303
По эллипсам	0,113	0,197	0,274	0,390
$m_z = 1,69 \frac{M_C f}{b} \sigma$ (7)	0,113	0,197	0,274	0,390
$m_z = \frac{2,5P_Z f M_C}{b}$ (5)	0,335	0,582	0,810	1,153
$m_z = 0,845 \frac{P_Z f M_C}{b}$ (10)	0,113	0,197	0,274	0,389

Анализируя полученные значения в таблице 2, можно сделать вывод, что формула предрасчета точности (7) дает результаты, соответствующие значениям эллипса погрешности, а СКО, полученные по формуле (5), оказались в три раза больше. Введем поправочный коэффициент $k = \frac{m_z(5)}{m_z(7)} = 2,96$, и формула (5) примет вид:

$$m_z = \frac{2,5P_z f M_c}{2,96b} = 0,845 \frac{P_z f M_c}{b}. \quad (10)$$

Результаты вычислений по формуле (10) приведены в таблице 2. Как видим, СКО определения высот m_z идентичны СКО, полученным как по эллипсам погрешностей, так и по формуле предрасчета точности (7).

В Инструкции [1] рекомендуют пользоваться не СКО, а средними ошибкам.

Формула перехода от СКО $m_{x,y}$ к средним $V_{x,y}$ имеет вид [5]:

$$m_{x,y} = 1,25V_{x,y}. \quad (11)$$

Формула обратного перехода будет выглядеть следующим образом:

$$V_{x,y} = \frac{m_{x,y}}{1,25} = 0,8m_{x,y}. \quad (12)$$

Не понятно, почему в Инструкции [1] для перехода от СКО к средним ошибкам принят коэффициент 0,71, а не 0,8, что соответствует теории математической обработки геодезических измерений [5].

С учетом формулы (12) выражения (9) и (10) будут соответственно иметь вид:

$$V_{x,y} = 0,336M_c P_{x,y}, \quad (13)$$

$$V_z = 0,676 \frac{M_c f}{b} P_z. \quad (14)$$

Перейдем от средних ошибок по осям координат к средним ошибкам планового положения [2; 3; 5]:

$$V_s = V_{x,y} \sqrt{2}. \quad (15)$$

С учетом (15) формула (13) будет:

$$V_s = 0,475M_c P_s. \quad (16)$$

В Инструкции приняты средние ошибки на плане, а не на местности, в этом случае формула (16) примет вид:

$$v_s = \frac{0,475M_c P_s}{M_K}. \quad (17)$$

Решим формулы (17) и (14) относительно P_s и P_z :

$$P_s = 2,105 \frac{v_s M_K}{M_c}, \quad (18)$$

$$P_z = 1,48 \frac{V_z b}{f M_c}. \quad (19)$$

Проверим выражения (18) и (19). Для этого на основании формул предрасчета точности определения координат (6) и (7) для обеспечения необходимых СКО $m_{x,y}$ и m_z вычислим масштабы аэрофото-съемки для аэрофотоаппаратов с разными фокусными расстояниями f , решив формулы (6) и (7) относительно M_c :

$$M_c = \frac{m_{x,y}}{0,84\sigma}, \quad (20)$$

$$M_c = \frac{m_z b}{1,69 f \sigma}. \quad (21)$$

Расчеты сделаем для выбранных параметров: $M_K - 2000$; $h = 0,5$ м; $V_S = 0,2M_K = 0,4$ м; $m_S = 1,25V_S = 0,5$ м; $m_{x,y} = \frac{m_S}{\sqrt{2}} = 0,354$ м (требуемая точность определения плановых координат); $V_Z = 0,2h = 0,1$ м; $m_Z = 1,25V_Z = 0,125$ м (требуемая точность определения высот); $f = 88; 153; 213; 303$ мм, $\sigma = 7$ мкм, следовательно, сканировать снимки будем с разрешением $P_S = 14$ мкм.

Как видно из формулы (20), масштаб снимков для обеспечения заданной точности определения плановых координат не зависит от величины фокусного расстояния, и для всех фокусных расстояний аэрофотоаппаратов будет одинаков и составит: $1:M_C = 1:60200$, а масштабы съемки для обеспечения точности определения высот для аэрофотоаппаратов с разными фокусными расстояниями будут отличаться. Значения их приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения масштабов фотографирования для обеспечения точности определения высот при $h = 0,5$ м

f , мм	88	153	213	303
$1:M_C$	1:11050	1:6350	1:4565	1:3210

Как видим, чем больше фокусное расстояние у аэрофотоаппарата, тем более крупный масштаб фотографирования должен быть выбран.

Величина элемента разрешения при сканировании для обеспечения точности определения плановых координат по формуле (18) составит $P_S = 14$ мкм.

Расчеты величины разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот по формуле (19) для масштабов фотографирования, вычисленных в таблице 3, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Величины разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот при $h = 0,5$ м

f , мм	88	153	213	303
P_Z , мкм	14	14	14	14

Таким образом, получили одинаковые значения разрешения при сканировании для разных фокусных расстояний аэрофотоаппаратов, что, по нашему мнению, справедливо, а масштабы фотографирования различны. Чем больше фокусное расстояние аэрофотоаппарата, тем более крупный масштаб съемки должен быть, так как чем больше фокусное расстояние аэрофотоаппарата, тем сложнее получить отметки с высокой точностью. Кроме того, точность определения высот точек местности обеспечить сложнее при малых высотах сечения рельефа, чем плановое положение.

Выполним расчеты для случая, когда высота сечения рельефа $h = 2$ м, $V_Z = 0,2h = 0,4$ м, $\sigma = 7$ мкм, $m_Z = 1,25V_Z = 0,5$ м. Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5

Значения масштабов фотографирования и величин разрешения при сканировании для обеспечения точности определения высот при $h = 2$ м

f , мм	88	153	213	303
$1:M_C$	1:44000	1:25000	1:18000	1:13000
P_Z , мкм	14	14	14	14

Масштабы съемки, приведенные в таблице 3, вычислены с точностью до последних единиц. Такие масштабы выдержать невозможно. Масштабы фотографирования всегда округляют. В таблице 5 выполнено округление масштабов до 500 единиц, что не повлияло на размер разрешения при сканировании.

И в этом случае масштаб аэрофотосъемки для обеспечения точности определения плановых координат останется прежним. Масштаб фотографирования для обеспечения точности определения высот стал мельче по сравнению с масштабами, приведенными в таблице 3, но и при больших высотах сечения рельефа масштаб фотографирования для обеспечения точности определения высот крупнее, чем для обеспечения точности определения плановых координат. Для фотографирования из двух рассчитанных масштабов выбирают масштаб более крупный. Следовательно, можно уменьшить число плановых опознаков.

Формулы (18) и (19) могут быть рекомендованы для расчета разрешения при сканировании.

Причина, по которой вопрос в справедливости формул (1) и (2) не поднимался ранее, кроется в том, что, во-первых, масштаб фотографирования выбирался более крупный; во-вторых, имеющаяся в Республике Беларусь аэрофотокамера имеет фокусное расстояние $f = 153$ мм, расчеты для которой по неверным

формулам и для продольного перекрытия снимков $P = 60\%$, приведенным в работе [3], оказались близки к данным, полученным как по эллипсам погрешностей, так и по формуле предрасчета точности определения высот (7). Поправочный коэффициент 2 в формуле (2), рекомендованный авторами Инструкции [1], случайно оказался кстати. Однако полученные в работе [3] результаты соответствуют формулам предрасчета точности и эллипсам погрешностей, где никаких поправочных коэффициентов не было.

В формулах (1) и (2) поправочный коэффициент 2 введен для учета потерь точности в ходе сканирования, стереоскопического наведения, опознавания и измерения точек [1]. Но, как отмечено в работе [4], СКО измерения $\sigma = 0,5$ размера элемента сканирования учитывает ошибки внутреннего ориентирования, сканирования, распознавания и наведения измерительной марки на точки. Однако для производства возможно и необходимо ввести поправочный коэффициент, особенно если нет уверенности в высокой квалификации персонала, но не 2, а меньший, например, равный 1,2 – 1,3, при постановке которого в знаменатель формул (18) и (19) эти формулы примут вид:

$$P_s = 2,105 \frac{v_s M_k}{1,2(1,3)M_c}, \quad (22)$$

$$P_z = 1,48 \frac{V_z b}{1,2(1,3)fM_c}. \quad (23)$$

Применяя коэффициент 2, придется либо увеличить масштаб фотографирования в два раза, что приведет к увеличению работ в два раза, либо сканировать снимки с размером пиксела, меньшим в два раза, что также приведет к увеличению работ.

Инструкция, или кодекс, – это руководство к действию. Специалисты предприятий должны неукоснительно следовать их требованиям. С течением времени инструктивные документы устаревают, или в них имеют место ошибки, поэтому они должны неоднократно редактироваться и все требования, предъявляемые в них, тщательно проверяться и при необходимости корректироваться.

Рассматриваемая нами Инструкция, однако, не подвергалась ни проверке, ни редактированию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов. – Минск: УП «БелНИЦЗЕМ», 2003. – 78 с.
2. Михеева, А.А. Проверка формул расчета разрешения при сканировании аэрофотоснимков для обеспечения точности определения координат точек местности / А.А. Михеева, В.И. Медведев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 12. – С. 103 – 108.
3. Михеева, А.А. Оценка формул расчета разрешения при сканировании аэрофотоснимков и формул предрасчета точности определения координат точек местности по эллипсам погрешностей / А.А. Михеева, В.И. Медведев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2011. – № 8. – С. 159 – 169.
4. Книжников, Ю.Ф. Зависимость точности стереоскопических измерений от размера пиксела цифровых снимков / Ю.Ф. Книжников // Геодезия и картография. – 2003. – № 4. – С. 32 – 41.
5. Справочник геодезиста / В.Д. Большаков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1975. – 1056 с.

Поступила 25.04.2012

CALCULATION OF THE RESOLUTION WHILE SCANNING FOR PROVIDING ACCURACY FOR DETERMINING COORDINATES

A. MIKHEEVA, V. MEDVEDEV

As the error ellipses give us more accurate information about average square errors, the data got on their basis were used for justification of the formulae of precalculation of the accuracy of determining the coordinates of the points on the surface and the formulae of the calculation of resolution while scanning to provide necessary accuracy of determining coordinates. The results of the calculation according to the suggested formulae proved their correctness. Approximate calculation of the scale to 500 units doesn't influence the results of the calculation of resolution while scanning. If the staff are of low qualification, correlation factor can be introduced to the denominator of the formulae of the calculation of resolution while scanning, but not for the errors in scanning, stereoscopic aiming, recognizing and measuring points. These errors are taken into account in average square errors of measuring coordinates on digital pictures.

УДК 528.2

**О ПРЕОБРАЗОВАНИИ КООРДИНАТ
ПУНКТОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ИЗ РЕФЕРЕНЦНОЙ СИСТЕМЫ СК-42
В ОБЩЕЗЕМНЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ПЗ-90 И WGS-84**

канд. техн. наук О.Н. ПИСЕЦКАЯ

(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки)

Исследуются референцная система координат СК-42 и общеземные системы координат ПЗ-90 и WGS-84. Преобразование возможно на основе параметров связи данных систем. Для каждой системы приведены параметры связи, полученные из разных источников. Приведены формулы связи референцной и общеземных систем координат из нескольких источников. На основе параметров связи систем координат выполнено преобразование координат геодезической сети Республики Беларусь из референцной системы координат в общеземные системы. Указаны формулы, которые не следует применять при перевычислении координат. Выполнен анализ перевычисления координат и даны практические рекомендации по использованию формул и параметров связи при выполнении перевычисления референцной системы координат в общеземные для территории Республики Беларусь.

Выполнение высокоточных измерений с помощью спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС и др.) тесно связано со строгими определениями координатных систем, относительно которых выполняются измерения. Измеряемые навигационные параметры спутников глобальной системы позиционирования и определяемые координаты спутниковых приемников отсчитываются в различных системах координат. В космической, спутниковой геодезии и астрономии используются прямоугольные (плоские и пространственные) и полярные (сферические и эллипсоидальные) системы координат. В зависимости от расположения начала координат различают геоцентрические с началом в центре масс Земли, геодезические с началом в центре референц-эллипсоида и топоцентрические с началом в точке на поверхности Земли [1]. В геодезии используют прямоугольную систему координат, начало O которой находится в центре масс Земли, ось Z направлена по оси вращения земли, ось X совмещена с линией пересечения плоскостей экватора и начального (гринвичского) меридиана, ось Y дополняет систему до правой. Такую систему координат называют геоцентрической или общеземной. В общеземной системе координат определяют положение пунктов на всей поверхности Земли. Если система координат введена для определения положения точек на части земной поверхности, например на территории одного государства, ее начало O может быть значительно (до сотен метров) смещено относительно центра масс. В этом случае говорят о референцной системе координат. Из-за неизбежных ошибок измерений при практическом задании общеземной системы возможно несовпадение ее начала с центром масс Земли и повороты осей. В связи с этим существует несколько реализаций общеземной геоцентрической системы координат и возникает необходимость перехода от одной системы координат к другой. Задача преобразования координат возникает также при переходе от референцной системы координат к общеземной и обратно [2].

Целью данной работы явилось исследование преобразования геодезических координат пунктов на территории Республики Беларусь из референцной системы координат СК-42 в общеземные системы координат ПЗ-90 и WGS-84 с использованием семипараметрического преобразования по различным формулам и параметрам связи систем координат.

Основная часть. Система координат 1942 года была создана в Советском Союзе с участием известных ученых Ф.Н. Красовского, М.С. Молоденского, А.А. Изотова. Она опирается на астрономо-геодезическую, гравиметрическую и нивелирную сети страны. С использованием их получены параметры референц-эллипсоида Красовского [3]: $a = 6378245$ м – большая полуось; $\alpha = 1:298,3$ – полярное сжатие; высоты геоида над ним. Эта координатная основа прослужила более 50 лет.

Средние квадратические ошибки положения любого пункта относительно начального – Пулково ($B = +59^{\circ}46'18,5''$; $L = +30^{\circ}19'38,6''$) – характеризуются величинами от единиц метров на западе страны до 15 м на востоке. В семидесятых годах прошлого столетия Главным управлением геодезии и картографии была начата модернизация государственной геодезической сети. Быстрое развитие спутниковых методов привело к повышению точности в несколько раз и достигает уровня 1 м [1].

Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90) получены с помощью спутника Гео-ИК, оснащенного радиовысотометром с ошибкой определения высоты над морской поверхностью менее 1 м, доплеровским передатчиком, обеспечивающим измерение на пунктах радиальной скорости с ошибкой 1 см/с, угловыми отражателями, запросной радиодальномерной системой с ошибкой измерения расстояний от пункта до спутника 1 – 2 м, системой импульсной световой сигнализации, обеспечивающей измерение направления с пункта на спутник с ошибкой 1" [4].

Геоцентрическая система координат ПЗ-90 создана без интеграции с зарубежными геодезическими сетями. Она закреплена координатами 30 опорных пунктов на территории бывшего СССР, полученными динамическим методом спутниковой геодезии. Координаты опорных пунктов (широта, долгота, высота) получены непосредственно по наблюдениям спутника Гео-ИК с точностью 1 – 2 м.

Основные параметры общеземного эллипсоида, полученные по 30 млн. спутниковых измерений на суше и в мировом океане имеют следующие значения [1]:

$a = 6378136$ м – большая полуось земного эллипсоида;

$f = 1:298,257\ 839\ 303$ – знаменатель сжатия земного эллипсоида.

Для семипараметрического преобразования координат приведем параметры связи двух систем координат: референц-системы 1942 года и общеземной системы координат ПЗ-90 [5].

Таблица 1

Параметры связи СК-42 и ПЗ-90

Δx , м	Δy , м	Δz , м	ω_x , "	ω_y , "	ω_z , "	Δm	Источник
25	-141	-80	0	-0,35	-0,66	0	ГОСТ 51794-2008 (прил. Б)

Геоцентрическая координатная система WGS-84 получена первоначально только с помощью спутников, без связи с данными сверхдлиннобазисной интерферометрии, и была представлена на земной поверхности в виде однородной глобальной сети с точностью координат пунктов 1 – 2 м. Система координат неоднократно уточнялась, с 1994 года используется версия WGS-84 (G 730), отличающаяся глобальной согласованностью порядка 10 см [6].

Основные параметры общеземного эллипсоида WGS-84, полученные по спутниковым измерениям на суше и в мировом океане, имеют следующие значения [1]:

$a = 6378137$ м – большая полуось земного эллипсоида,

$f = 1:298,257\ 223\ 563$ – знаменатель сжатия земного эллипсоида.

Для последующего преобразования координат пунктов приведем параметры связи системы координат СК-42 и геоцентрической координатной системы WGS-84, полученных из разных источников (табл. 2).

Таблица 2

Параметры связи СК-42 и WGS-84

№	Δx , м	Δy , м	Δz , м	ω_x , "	ω_y , "	ω_z , "	Δm	Источник
1	23,92	-141,27	-80,90	0	0,35	0,82	$-0,12 \cdot 10^{-6}$	ГОСТ 51794-2001
2	27	-135	-84,5	0	0	$-2,686 \cdot 10^{-6}$	$2,263 \cdot 10^{-7}$	ERDAS IMAGINE [7]
3	25	-141	-78,5	0	-0,35	-0,736	0	EPSG: 15865 [8]

Преобразование пространственных прямоугольных или эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую координатную систему того же типа по достаточно строгим формулам с использованием точно определенных параметров перехода является достаточно простой задачей для трехмерных координатных систем ПЗ-90 и СК-42 и связанных с ними двухмерных топоцентрических систем (Государственная система координат, местные системы координат), а также для трехмерной системы WGS-84 [1].

Приведем формулы связи пространственных прямоугольных и геодезических координат [9]:

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L; \\ Y &= (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L; \\ Z &= (N + H - Ne^2) \cdot \sin B, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где N – радиус кривизны эллипсоида в первом вертикале.

Обратный переход от прямоугольных к геодезическим координатам в общем случае осуществляют последовательными приближениями.

Находим

$$\operatorname{tg} L = Y / X. \quad (2)$$

Для получения B введем вспомогательные величины:

$$Q = X / \cos L = Y / \sin L = (N + H) \cdot \cos B, \quad (3)$$

$$T = Z + Ne^2 \cdot \sin B = (N + H) \cdot \sin B. \quad (4)$$

В первом приближении полагаем

$$\operatorname{tg} B^0 = \frac{Z}{(Q \cdot (1 - e^2))}. \quad (5)$$

В последующих приближениях пользуемся формулой

$$\operatorname{tg} B^i = T^{i-1} / Q, \quad (6)$$

где через T^{i-1} обозначено значение T , полученное с использованием значения широты B из предыдущего $(i-1)$ -го приближения.

После нахождения окончательного значения определяем H по формуле:

$$H = Q / \cos B - N. \quad (7)$$

Связь прямоугольных пространственных координат в общеземной и референцной системах в общем случае описано соотношением в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + R_{\bar{y},y} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} (1 + \Delta m). \quad (8)$$

В данной формуле чертой сверху отмечены величины, относящиеся к общеземной системе координат. Через x, y, z обозначены координаты центра референц-эллипсоида относительно центра масс Земли. Множитель $(1 + \Delta m)$ дает масштабную поправку за переход от референцной к общеземной системе. Через $R_{\bar{y},y}$ обозначена соответствующая матрица вращения. Разворот осей референцной системы координат относительно общеземной не превышает нескольких секунд.

Матрица в упрощенном виде будет иметь вид:

$$R_{\bar{y},y} = \begin{pmatrix} 1 & +\varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & +\varepsilon_x \\ +\varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где через $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ обозначены малые углы поворота (в радианной мере) вокруг осей референцной системы координат, соответствующих индексам, при переходе к общеземной системе.

На основании формул (8) и (9) запишем развернутые формулы связи прямоугольных пространственных координат в общеземной и референцной системах:

$$\left. \begin{aligned} \bar{X} &= X + X \Delta m + \varepsilon_z Y - \varepsilon_y Z + x; \\ \bar{Y} &= Y + Y \Delta m + \varepsilon_x Z - \varepsilon_z X + y; \\ \bar{Z} &= Z + Z \Delta m + \varepsilon_y X - \varepsilon_x Y + z. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В расчетах используем следующие зависимости между геодезическими пространственными координатами в общеземной и референцной системах [9]:

$$\bar{H} - H = x \cos B \cdot \cos L + y \cos B \sin L + z \sin B - \Delta a \left(1 - \frac{e^2}{2} \cdot \sin^2 B \right) + \frac{a \Delta e^2}{2} \cdot \sin^2 B \cdot \left(1 + \frac{e^2}{2} \sin^2 B \right) + \Delta m a; \quad (11)$$

$$\bar{B} - B = -\frac{\rho''}{M + H} \cdot \left[x \sin B \cos L + y \sin B \sin L - z \cos B - \Delta a e^2 \sin B \cos B - a \Delta e^2 \sin B \cdot \cos B (1 + e^2 \sin^2 B) \right] - \varepsilon_x'' \sin L + \varepsilon_y'' \cos L; \quad (12)$$

$$\bar{L} - L = -\frac{\rho''}{N + H \cos B} \cdot \left[x \sin L - y \cos L - \varepsilon_x'' \cos L \operatorname{tg} B + \varepsilon_y'' \sin L \operatorname{tg} B - \varepsilon_z'' \right], \quad (13)$$

где Δa – разность больших полуосей общеземного эллипсоида и референц-эллипсоида; Δe^2 – разность квадратов соответствующих эксцентриситетов.

Радиусы кривизны первого вертикала N и радиус кривизны меридиана M следует вычислять, используя следующие зависимости:

$$N = a \frac{1 - 0,25e^2 \sin^2 B}{1 - 0,75e^2 \sin^2 B}; \quad (14)$$

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{(\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B})^3}. \quad (15)$$

Однако по результатам выполненных исследований была установлена несостоятельность формул (11) – (13) в связи со значительным отклонением приращений геодезических координат от контрольных вычислений. Выполнение преобразований координат из одной системы в другую осуществлялось по следующим зависимостям [2]:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = (1 + m) \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 - x_0 \\ Y_1 - y_0 \\ Z_1 - z_0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где $X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2$ – координаты точки в первой и второй системах соответственно; x_0, y_0, z_0 – координаты начала референцной системы координат в общеземной системе; m – отличие масштабов двух систем.

Широту B вычисляем также методом приближений, причем в первом приближении находим приведенную широту по формуле:

$$\operatorname{tgu} = \frac{Z}{Q\sqrt{1 - e^2}}. \quad (17)$$

После вычисления приведенной широты геодезическую широту находим по формуле Боуринга:

$$\operatorname{tg} B = \frac{Z + e^2 \frac{a \sin^3 u}{\sqrt{1 - e^2}}}{Q - e^2 a \cos^3 u}. \quad (18)$$

Геодезическую высоту H вычисляют по формуле (7) или по следующей формуле:

$$H = Q \cos B + Z \sin B - a\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}. \quad (19)$$

Запишем формулы для изменения dH, dB, dL геодезических координат при переходе от одного эллипсоида к другому [2]:

$$dH = m \left[X_1 \cos L + Y_1 \sin L \cos B + Z_1 \sin B \right] - x_0 \cos L + y_0 \sin L \cos B - z_0 \sin B - da + \\ + \frac{1}{2} (e^2 da + ade^2) \sin^2 B + \varepsilon_x Z_1 \sin L \cos B - Y_1 \sin B - \varepsilon_y Z_1 \cos L \cos B - X_1 \sin B; \quad (20)$$

$$M + H \quad dB = -m \left[X_1 \cos L + Y_1 \sin L \sin B - Z_1 \cos B \right] + x_0 \cos L + y_0 \sin L \sin B + \\ + \frac{1}{2} e^2 da + ade^2 \sin 2B - \varepsilon_x Z_1 \sin L \sin B + Y_1 \cos B + \varepsilon_y Z_1 \cos L \sin B + X_1 \cos B; \quad (21)$$

$$N + H \quad \cos B dL = x_0 \sin L - y_0 \cos L + Z_1 \varepsilon_y \sin L + \varepsilon_x \cos L - \varepsilon_z Y_1 \sin L + X_1 \cos L. \quad (22)$$

Формулы (20) – (22) позволяют найти изменения геодезических эллипсоидальных координат при изменении размера и формы эллипсоида и его ориентирования внутри Земли.

В качестве исходных данных для выполнения преобразования пространственных координат выступают геодезические координаты пунктов высокоточной опорной геодезической аэродромной сети (ВОГАС) Республики Беларусь [10]. Данная сеть построена с высокой точностью и соответствует высокоточной геодезической сети (ВГС), концепция которой разработана в Российской Федерации. В связи с условием режимности геодезические координаты пунктов приведены в условной системе координат, равнозначной системе СК-42 (табл. 3).

Таблица 3

Геодезические координаты пунктов

№ пункта	$B, ^\circ ' ''$	$L, ^\circ ' ''$	$H, \text{ м}$
1	52°09'47,12"	23°51'42,14"	134,710
2	53°39'27,21"	24°02'1°,64"	202,000
3	55°11'19,75"	30°20'51,17"	249,547
4	52°34'56,47"	31°01'24,9°"	22,058
5	53°55'38,42"	27°30'50,21"	250,000

Выполняем семипараметрическое преобразование координат пунктов из референц-системы 1942 года (СК-42) в общеземную систему координат ПЗ-90. В результате получаем следующие геодезические координаты пунктов, представленные в таблице 4.

Таблица 4

Геодезические координаты пунктов в системе ПЗ-90

№ пункта	$B, ^\circ ' ''$	$L, ^\circ ' ''$	$H, \text{ м}$
1	52°09'47,60"	23°51'49,93"	329,466
2	53°39'27,60"	24°02'18,67"	397,621
3	55°11'19,69"	30°20'59,17"	454,330
4	52°34'56,51"	31°01'32,43"	227,367
5	53°55'38,59"	27°30'58,14"	450,651

Выполним преобразования геодезических координат из системы координат СК-42 в геоцентрическую систему координат WGS-84, используя различные параметры связи из 3-х источников (табл. 5).

Таблица 5

Геодезические координаты пунктов в системе координат WGS-84

№ пункта	$B, ^\circ ' ''$	$L, ^\circ ' ''$	$H, \text{ м}$
Источник: ГОСТ 51794-2001			
1	52°09'48,23"	23°51'48,81"	329,196
2	53°39'28,23"	24°02'17,57"	397,343
3	55°11'20,28"	30°20'58,18"	454,023
4	52°34'57,10"	31°01'31,40"	227,071
5	53°55'39,20"	27°30'57,08"	450,361
Источник: ERDAS IMAGINE			
1	52°09'48,12"	23°51'49,21"	329,634
2	53°39'28,12"	24°02'17,95"	397,941
3	55°11'20,20"	30°20'58,52"	454,534
4	52°34'57,02"	31°01'31,78"	227,244
5	53°55'39,11"	27°30'57,45"	450,837
Источник: EPSG: 15865			
1	52°09'47,57"	23°51'50,01"	327,328
2	53°39'27,58"	24°02'18,75"	395,462
3	55°11'19,66"	30°20'59,24"	452,148
4	52°34'56,48"	31°01'32,50"	225,222
5	53°55'38,56"	27°30'58,21"	448,487

В таблицах 6 и 7 приведены данные вычислений зависимости между геодезическими координатами в общеземной и референцной системах (формулы (20) – (22)) и выполнен внутренний контроль вычислений при выполнении преобразований координат из системы СК-42 в системы ПЗ-90 и WGS-84.

Таблица 6

Контроль преобразования геодезических координат из СК-42 в ПЗ-90

№ пункта	$\bar{H} - H$	Контроль	$\bar{B} - B$	Контроль	$\bar{L} - L$	Контроль
1	194,750860	194,756225	0,477205	0,477494	7,794686	7,794595
2	195,615594	195,621239	0,394069	0,394365	8,033706	8,033608
3	204,776739	204,782550	-0,063604	-0,063192	7,998353	7,998220
4	205,303335	205,308621	0,038445	0,038748	7,527367	7,527247
5	200,645021	200,650645	0,171405	0,171708	7,925328	7,925213

Таблица 7

Контроль преобразования геодезических координат из СК-42 в WGS-84

№ пункта	$\bar{H} - H$	Контроль	$\bar{B} - B$	Контроль	$\bar{L} - L$	Контроль
Источник: ГОСТ 51794-2001						
1	194,481418	194,486492	1,108570	1,108878	6,666833	6,666780
2	195,338045	195,343422	1,023173	1,023488	6,928133	6,928077
3	204,470817	204,476395	0,529762	0,530092	7,005937	7,005848
4	205,008253	205,013264	0,630013	0,630333	6,498514	6,498433
5	200,356049	200,361414	0,782179	0,782500	6,872046	6,871974
Источник: ERDAS IMAGINE						
1	194,918949	194,924161	0,997137	0,997440	7,069651	7,009590
2	195,935934	195,941440	0,912883	0,913194	7,312168	7,312103
3	204,981479	204,987174	0,449451	0,449776	7,355449	7,355351
4	205,180375	205,185522	0,552111	0,552432	6,883247	6,883158
5	200,831440	200,836932	0,687988	0,688304	7,244815	7,244734
Источник: EPSG: 15865						
1	192,612725	192,618216	0,449774	0,450072	7,870686	7,870594
2	193,455736	193,461514	0,367621	0,367925	8,109706	8,109608
3	202,595443	202,601395	-0,088933	-0,088612	8,074353	8,074218
4	203,159026	203,164441	0,011288	0,011600	7,603367	7,603245
5	198,481325	198,487084	0,145135	0,145447	8,001328	8,001212

Отклонения между контрольными и вычисленными значениями представлены в таблицах 8, 9.

Таблица 8

Отклонения приращений геодезических координат от контрольных вычислений при преобразовании координат из СК-42 в ПЗ-90

№ пункта	$\Delta_{\bar{H}-H}$	$\Delta_{\bar{B}-B}$	$\Delta_{\bar{L}-L}$
1	-0,005365	0,000289	0,000091
2	-0,005645	0,000296	0,000098
3	-0,005811	0,000312	0,000135
4	-0,005286	0,000303	0,000121
5	-0,005624	0,000302	0,000114

Таблица 9

Отклонения приращений геодезических координат от контрольных вычислений при преобразовании координат из СК-42 в WGS-84

№ пункта	$\Delta_{\bar{H}-H}, \text{ м}$	$\Delta_{\bar{B}-B}, ''$	$\Delta_{\bar{L}-L}, ''$
Источник: ГОСТ 51794-2001			
1	-0,005074	0,000308	0,000005
2	-0,005378	0,000315	0,000006
3	-0,005578	0,000330	0,000009
4	-0,005012	0,000320	0,000008
5	-0,005365	0,000321	0,000007
Источник: ERDAS IMAGINE			
1	-0,005212	0,000303	0,000006
2	-0,005506	0,000311	0,000006
3	-0,005695	0,000325	0,000010
4	-0,005148	0,000315	0,000009
5	-0,005492	0,000316	0,000008
Источник: EPSG: 15865			
1	-0,005491	0,000297	0,000009
2	-0,005778	0,000304	0,000010
3	-0,005952	0,000321	0,000134
4	-0,005414	0,000311	0,000122
5	-0,005758	0,000311	0,000115

Анализируя таблицы 8 и 9, можно сделать выводы о том, что максимальные отклонения получены по вычисленным приращениям высот, минимальные отклонения – по приращениям долгот. Причем эти отклонения не зависят от параметров связи систем координат СК-42 и WGS-84. Следует отметить, что при выполнении преобразований координат из системы СК-42 в общеземную систему WGS-84, независимо от параметров связи данных систем, отклонения приращений координат от контрольных вычислений практически совпадают и сопоставимы с отклонениями приращений координат в системе ПЗ-90.

Заключение. Анализ полученных результатов исследований свидетельствует:

1) в результате проведенных исследований выполнены преобразования геодезических координат пунктов из системы координат СК042 в общеземные системы координат ПЗ-90 и WGS-84 геодезической сети Республики Беларусь по зависимостям (1) – (15) и (16) – (22). Установлено, что формулы (1) – (15) не целесообразно применять при переходе из одной системы координат в другую, так как отклонения приращений геодезических координат от контрольных вычислений колеблются: по высоте от 0,000066 до –0,037044 м; по широте от 0,000175 до 0,319626″; по долготе от 0,000046 до 0,001823″. Зависимость отклонений между значениями в общеземных системах координат не прослеживается;

2) рекомендуется использовать при выполнении преобразований координат из референц-системы СК-42 в общеземные системы координат ПЗ-90 и WGS-84 формулы (16) – (22), так как отклонения от контрольных вычислений незначительны и сопоставимы в общеземных системах координат (см. табл. 8 – 9);

3) преобразования координат из референц-системы СК-42 в общеземную систему WGS-84 осуществлялось путем семипараметрического преобразования по трем вариантам параметров связи систем координат (см. табл. 5).

По результатам выполнения контроля преобразования геодезических координат из СК-42 в WGS-84 (см. табл. 7) можно говорить о возможности использования следующих параметров связи для выполнения преобразований на территории Республики Беларусь:

$$\Delta x = 23,92 \text{ м}; \Delta y = -141,27 \text{ м}; \Delta z = -80,90 \text{ м}; \omega_x = 0''; \omega_y = 0,35''; \omega_z = 0,82''; \Delta m = -0,12 \cdot 10^{-6},$$

или

$$\Delta x = 27 \text{ м}; \Delta y = -135 \text{ м}; \Delta z = -84,5 \text{ м}; \omega_x = 0''; \omega_y = 0''; \omega_z = -2,686 \cdot 10^{-6}''; \Delta m = 2,263 \cdot 10^{-7},$$

так как по точности преобразований использование данных параметров равнозначно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генике, А.А. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии / А.А. Генике, Г.Г. Побединский. – М.: «Картгеоцентр» – Геодезиздат, 1999. – 272 с.
2. Огородова, Л.В. Высшая геодезия / Л.В. Огородова: учебник для вузов. – М.: Геодезкартиздат, 2006. – Ч. III. Теоретическая геодезия. – 384 с.
3. Закатов, П.С. Курс высшей геодезии / П.С. Закатов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 511 с.
4. Опыт создания геоцентрической системы координат ПЗ-90 / В.В. Бойков [и др.] // Геодезия и картография. – 1993. – № 11. – С. 17 – 21.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://Gis-lab.info/qa/datum-transform-sets.html>.
6. Hofmann-Wellenhof, B. Global Positioning System. Theorie und Praxis / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins. – Springer, Wien, New York, 1993. – 200 p.
7. [Электронный ресурс] // ERDAS IMAGINE: файл spheroid.tab.
8. EPSG: База MS Access.
9. Практикум по высшей геодезии (вычислительные работы): учеб. пособие для вузов / Н.В. Яковлев [и др.]. – М.: Недра, 1982. – 368 с.
10. Кузнецов, Г.И. Создание в Республике Беларусь основы для модернизации Государственной геодезической сети / Г.И. Кузнецов, В.В. Мкртычян, А.А. Коваль // Геодезия и картография. – 1999. – № 7. – С. 9 – 14.

Поступила 24.05.2012

THE TRANSFORMATION OF THE COORDINATE POINTS OF THE GEODETIC NETWORK OF THE REPUBLIC OF BELARUS OF THE REFERENCE SYSTEM 42 YEARS IN COMMON TERRESTRIAL COORDINATE SYSTEM PARAMETERS OF THE EARTH-90 AND WGS-84

O. PISECKAYA

The article describes the Reference System 42 years and the common terrestrial systems coordinate Parameters of the Earth-90 and WGS-84. Conversion is possible on the basis of the communication parameters of these systems. For each system, the communication parameters are derived from different sources. The formulas and common terrestrial communication y coordinate referents-systems from multiple sources. On the basis of the communication parameters of coordinate systems coordinate the conversion of geodetic network of the Republic of Belarus Reference System coordinates in common terrestrial systems. Indicated formulas, which should not be used for recalculation of the coordinates. The analysis of the recalculation of the coordinates and are practically recommendations on the use of formulas and parameters when the connection recalculation common terrestrial coordinate referents-system for the territory of the Republic of Belarus.

УДК 332.54.001.102

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ЗЕМЕЛЬ
ПРИ ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННОМ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ****П.Н. ФОМЕНКО***(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки)*

Рассматриваются вопросы содержания и методики разработки проекта внутрихозяйственного землеустройства сельскохозяйственной организации, в частности вопросы организации земель и севооборотов. Организация земель и системы севооборотов является основой для дальнейшего устройства территории сельскохозяйственного предприятия. Предложена технология землеустроительного проектирования с использованием географических информационных систем и технологий. Разработана структурно-функциональная схема ГИС-обеспечения организации земель и севооборотов. На её основе возможно широкое применение методов математического моделирования во внутрихозяйственном землеустройстве. В соответствии с данной схемой рассмотрены этапы осуществления проекта. Описана последовательность выполнения действий организации земель средствами ArcView GIS.

Введение. Геоинформационное обеспечение внутрихозяйственного землеустройства – один из путей инновационного совершенствования процесса управления сельскохозяйственным производством. Его внедрение позволяет решить следующие задачи:

- повысить оперативность производства проектов внутрихозяйственного землеустройства;
- осуществить систему автоматизированного управления сельскохозяйственным производством на региональном уровне с применением сетевых технологий;
- повысить качество проектирования широким применением методов математического моделирования распределения земельных ресурсов с целью их эффективного использования.

Анализ источников

На современном этапе сельскохозяйственное производство требует обоснованной организации использования и охраны земель, рационального размещения средств производства. Данные вопросы решаются в процессе землеустройства.

Вопросами внутрихозяйственного землеустройства, в частности организацией земель, занимались многие ученые: С.Н. Волков [1], Ф.К. Куропатенко [2], В.Ф. Колмыков [3] С.А. Сулин [4], С.А. Удачин [5] и др. Ими получены достаточно обширные разработки в данной области, которые актуальны и в настоящее время. В связи с бурным развитием информационных технологий появилась возможность автоматизировать процесс разработки проектов внутрихозяйственного землеустройства.

Цель данного исследования – геоинформационное обеспечение организации земель при внутрихозяйственном землеустройстве.

Задачи исследования – разработка модулей для выполнения подготовительных работ, агроэкологического зонирования, формирования рабочих участков и организации севооборотов.

Методы исследования

В настоящей работе геоинформационное обеспечение представляется в виде ГИС-проекта всех этапов внутрихозяйственного землеустройства:

- подготовительные работы;
- обоснование проектных решений по структуре земель сельскохозяйственного предприятия;
- организация системы севооборотов на основе эколого-ландшафтного подхода;
- устройство территории сельскохозяйственного предприятия.

Рассмотрим поэтапно каждый из них.

1. Подготовительные работы

На этапе подготовительных работ выполняются следующие задачи:

- подготовка планово-картографических материалов и земельно-учетных данных;
- комплексное обследование территории;
- анализ производственной деятельности и установление перспектив развития хозяйства;
- определение состояния и перспектив размещения населенных пунктов и производственных центров.

На рисунке 1 представлена разработанная нами структурно-функциональная схема ГИС-обеспечения организации земель. В соответствии с данной схемой на рассматриваемом этапе осуществляются следующие процессы:

- *сканирование исходного плана.* В связи с тем, что исходный картографический материал имел значительные размеры, сканирование выполнялось по частям, а затем части были сшиты в программе Adobe_Photoshop;

- после сшивки выполнена привязка картографического изображения к соответствующей системе координат в программе Credo_Transform;
- осуществлено экспортирование проекта в программу ArcView;
- созданы объекты внутрихозяйственного землеустройства методом векторизации в среде ArcView.

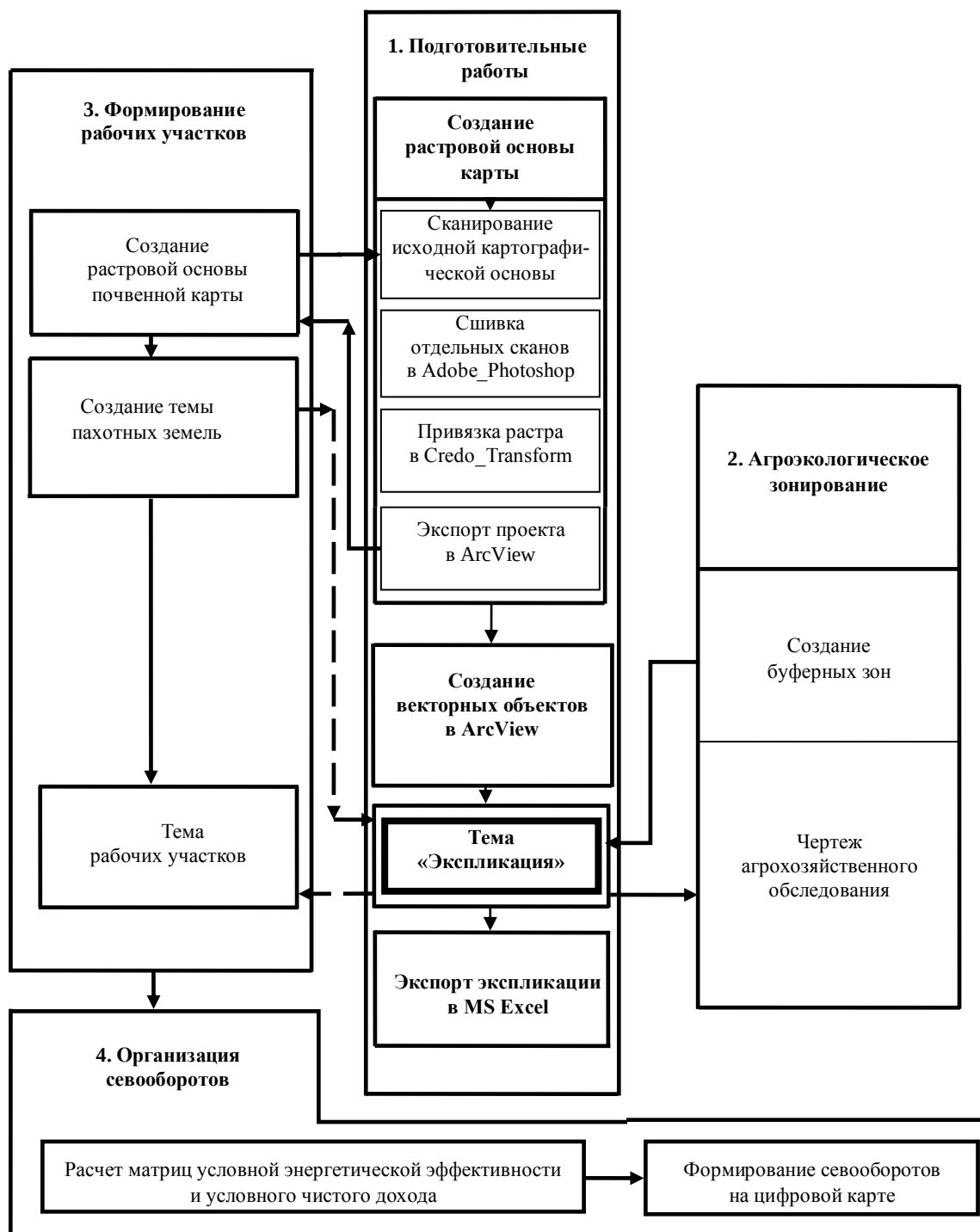


Рис. 1. Структурно-функциональная схема ГИС-обеспечения организации земель

Конечно, сшивку и привязку поддерживает Credo_Transform, но бывают случаи (отсутствует координатная сетка), когда без Adobe_Photoshop обойтись сложно.

Процесс векторизации включал выполнение следующих действий:

- выбор начальных установок по команде **Вид** → **Свойства**;
- установление нового слоя объектов по команде **Вид** → **Новый** → **Добавить тему**.

В установленном режиме создаются линейные и площадные объекты. При этом линейные объекты могут создаваться одним из следующих способов:

а) созданием новой линейной темы по командам: **Вид** → **Новая тема** → **Линия** → **ОК** – создания новой линейной темы, **Свойства Темы** → **Редактирование** → **Замыкание** → **Общее** или **Интерактивное** – определения режима замыкания;

б) отображением линейных объектов конечной ширины в виде буферных зон по команде:

Тема → **Создать буферные зоны** → **Метод создания буферных зон** → **На расстоянии по полю атрибута**.

Второй способ создания линейных объектов предпочтителен в отношении корректности топологии объектов, которая заключается в том, что смежные объекты имеют общую границу, не накладываются и не пересекаются. Все буферные зоны сохранены в новой теме – **Экспликация**. Она является основой для создания темы площадных объектов. При создании площадных тем с точки зрения землеустроителя важно, чтобы смежные объекты этой темы не имели промежутков или перекрытий и идеально состыковывались между собой. Для этого, как и при создании линейной темы, установили режим замыкания. Допуск на замыкание задан равным 5 метров. Площадные объекты создавались аналогично линейным по команде: **Вид** → **Новая тема** → **Полигон** → **ОК** с допуском на замыкание 5 метров. Неточности векторизации исправляются инструментом **Редактировать вершины**.

В процессе векторизации полигональных объектов они приобретают определенный цвет. Для удобства распознавания контуров земель была отредактирована легенда. В редакторе легенды указываем **Тип легенды** – **Уникальное значение**, **Поле значений** – **Вид земель**. Цветовое оформление полигонов осуществляется по командам **Тема** → **Редактировать легенду**, **Тип легенды** → **Уникальное значение** → **Поле значений** → **Вид земель**.

Далее с помощью модуля «CS_29 Коллекция скриптов» были рассчитаны площади всех площадных объектов, все темы объединяются в одну «Экспликация» в виде электронной карты (рис. 2), а сама таблица площадей – экспликация земель – экспортирована в MS Excel.



Рис. 2. Электронная карта темы «Экспликация»

По результатам комплекса исследований, анализа производственной деятельности, состояния и перспектив развития хозяйства могут создаваться и храниться соответствующие базы данных [1; 4].

2. Обоснование проектных решений по структуре земель сельскохозяйственного предприятия

2.1. Агроэкологическое зонирование территории предприятия

Агроэкологическое зонирование территории представляет собой результат ее разделения на относительно однородные по функциональному назначению и природно-экологическим свойствам земельные участки. Оно осуществляется с использованием материалов почвенных, геоботанических, мелиоративных, землеустроительных и других обследований и изысканий.

Для зонирования территории по плану землепользования выявляются основные природные и антропогенные объекты, которые требуют защиты от загрязнения и деградации или, напротив, сами являются источниками загрязнения и деградации окружающей среды и тем самым определяют режим использования прилегающих к ним земель, содержание необходимых природоохранных мероприятий.

Для каждой из выделенных зон регламентированы особенности использования земель и технологии сельскохозяйственного производства.

Основой для агроэкологического зонирования является тема «Экспликация», в которой выбираются объекты, которые являются как источниками загрязнений, так и сами требуют защиты от загрязнений. Вокруг источников загрязнения создаются буферные зоны [7; 8] по команде **Тема** → **Создать буферные зоны** → **На расстоянии по полю атрибута** (рис. 3). Поскольку буферные зоны не должны выходить за границы хозяйства, то их обрезают по этой границе по команде **Вид** → **Мастер пространственных операций** → **Вырезать одну тему с использованием другой**. В качестве входной темы здесь выбирается «Экспликация», а полигональной отсекающей – буферные зоны. В результате буферные зоны примут корректный вид. Площади буферных зон определяются автоматически и помещаются в соответствующие таблицы. Из темы «Экспликация» выбираются объекты посторонних землепользователей. Окончательно агроэкологические участки и объекты посторонних землепользователей объединяются по команде **Тема** → **Преобразовать в Шейп-файл** в чертеж агрохозяйственного обследования (рис. 4) под названием «Чертеж агрохозяйственного обследования».



Рис. 3. Буферные зоны



Рис. 4. Чертеж агрохозяйственного обследования

2.2. Формирование и оценка тополого-технологических однородных рабочих участков

Для формирования рабочих участков создается растровая основа почвенной карты по такому же алгоритму, что и растровая основа ГИС-проекта (см. рис. 2 и рис. 4).

Параллельно с этим из темы «Экспликация» по команде **Тема** → **Преобразовать в Шейп-файл** выбираются пахотные контуры, которые в соответствии с почвенной картой объединяются в рабочие участки. По сформированным рабочим участкам устанавливаются основные экологические и технические показатели: тип и механический состав почв, степень их увлажнения, каменистости, эродированности, длина гона, угол склона, конфигурация и удаленность от хозяйственного центра [4].

Данные о типе почв, их механическом составе, степени увлажнения, каменистости, эродированности и мелиоративному состоянию определяется по почвенным картам и другим материалам обследований и изысканий. На рабочих участках преобладают торфяные среднемощные почвы на дерново-осоковых торфах. По степени эродированности выделяют незэродированные, рабочие участки.

Длина гона рабочего участка определялась с помощью инструмента **Измерить**. Если участок правильной формы, то длину гона определяли путем измерения длинной стороны участка, если участок неправильной формы – с помощью инструмента Полигон строили прямоугольник, площадь которого примерно равнялась площади участка, и измеряли длинную сторону полигона.

Экологическая характеристика рабочих участков представляется соответствующей базой данных, представленной в таблице.

Эколого-технологическая характеристика рабочих участков

Номер рабочего участка	Площадь рабочего участка	Тип почв и степень увлажнения	Механический состав	Средний уклон, град.	Каменистость, м ³ /га.	Степень эродированности	Конфигурация	Длина гона, км	Удельное сопротивление, КПА	Код предшественника	Коэффициент потерь гумуса за механический состав	Удаленность от центральной усадьбы
1	36,74	Дерново-глееватые	Супесчаные	1	5	Неэродированные	5	8,56	45	1	1,4	1,3
2	38,43	Торфяно-болотные	Торфяные	1	5	Неэродированные	3	5,12	45	2	1,5	1,9
3	45,88	Торфяно-болотные	Торфяные	1	5	Неэродированные	2	5,99	45	3	1,6	1,4
4	39,49	Торфяно-болотные	Торфяные	1	5	Неэродированные	2	5,74	45	1	1,6	1,4
5	57,69	Торфяно-болотные	Торфяные	1	5	Неэродированные	2	5,89	45	2	1,6	0,1
6	72,8	Торфяно-болотные	Торфяные	1	5	Неэродированные	5	5,20	45	1	1,6	0,1
7	57,04	Торфяно-болотные	Торфяные	1	5	Неэродированные	1	5,49	45	3	1,6	1,5
8	24,65	Торфяно-болотные	Торфяные	1	5	Неэродированные	2	8,12	45	8	1,6	2,4
Итого	372,72											

3. Организация севооборотов на основе темы рабочих участков

Для размещения посевов по рабочим участкам вычислялись эквивалентные расстояния от производственных центров до рабочих участков, затем была дана эколого-технологическая характеристика рабочих участков. При составлении эколого-технологической характеристики рабочих участков уточнялся тип почв, механический состав, средний уклон, каменистость, конфигурация, длина гона, определялся коэффициент потери гумуса за механический состав и удаленность от центральной усадьбы. На основе полученных данных определялся балл экономической оценки рабочих участков [4].

Для выполнения расчетов предшественники по участкам кодировались следующим образом: озимым зерновым присваивалось значение 1, яровым зерновым – 2, зернобобовым – 3, картофелю – 4, льну – 5, кормовым корнеплодам – 6, кукурузе – 7, однолетним травам – 8, многолетним травам – 9. Расчет условной энергетической эффективности возделывания сельскохозяйственных культур по рабочим участкам производился по программе «Zempro2.0», разработанной на основе «Zempro2.01» [4; 6]. Исходные данные по рабочим участкам и культурам, необходимые для выполнения расчетов, сводились в таблицы.

Результатом оценки рабочих участков по эффективности возделывания сельскохозяйственных культур являются матрицы условной энергетической эффективности (рис. 5) и условного чистого дохода. Данная матрица – основа для организации системы севооборотов или ежегодного размещения посевов по рабочим участкам.

В диалоговом окне командой **Рассчитать** → **Разместить** → **Следующий год** осуществляется размещение посевов сельскохозяйственных культур по годам.

После размещения посевов сельскохозяйственных культур нужно просмотреть полученные результаты и при необходимости их откорректировать вручную. Для автоматизированного создания полей

по каждому рабочему участку определялось чередование культур. Дальнейшая задача заключалась в нанесении севооборотов на карту. Для этого создано 8 точечных тем для каждого рабочего участка. На каждом участке расставляются 5 точек по вертикали. В атрибутивной таблице заполнили чередования культур по годам по команде **Тема → Автоподпись**.

Земпро2.0

Проект Проверить О программе

Рабочих участков: 8 петя E:\ТЕКСТОВЫЕ ДОКУМЕНТЫ\землеустр. магистр\курсач\Моя матрица

Кoeffициенты пересчета | Посев | Результаты расчета | Матрица условного дохода | Матрица предшественников
 Баллы плодородия | Характеристики рабочих участков | Урожай | Культуры | Матрица условной энергетической эффективности

№	№уч.	площ.	оз.	яр.	зерноб.	карт.	лен	корм.	кукур	однол.	мн.
1	1	36,74	26412	20999	20300	15825	131160	73390	798349	480053	6590
2	2	38,43	36349	31801	29056	51715	-12282	127198	-2192	4726	10632
3	3	45,88	37936	32460	30332	52847	-12552	127722	-2675	4829	11341
4	4	39,49	36124	31590	28869	50282	-12733	124924	-3010	4603	10713
5	5	57,69	39303	34301	31482	55950	-11983	134884	-1158	5757	12162
6	6	72,8	40510	34627	32491	57543	-12201	136642	-1429	5551	12140
7	7	57,04	38487	33564	30802	53563	-12687	131862	-2847	4705	11650
8	8	24,65	41347	36181	34002	54451	-7101	126494	2662	5115	11212
Площади		372,7	108,1	100,6	0	0	0	0	0	0	164
Ур-сть			3,5	3	2,6	25,6	1	44,8	25,6	20,5	5,1

Ввести Сохранить Открыть Расчитать Разместить посевы

Рис. 5. Матрица условной энергетической эффективности

Выводится чередование культур на цифровую карту. Аналогичным образом создаются темы для остальных рабочих участков. Для более удобной работы с подписями осуществляется операция **Слить темы в одну**, что приводит к окончательному результату – Севообороты (рис. 6).



Рис. 6. Тема «Севообороты»

В заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

- 1) в разработанной структурно-функциональной схеме ГИС-обеспечения организации земель решается вопрос автоматизации внутрихозяйственного землеустроительного проектирования;
- 2) на основе схемы возможно широкое применение методов математического моделирования во внутрихозяйственном землеустройстве;
- 3) сам проект внутрихозяйственного землеустройства в цифровом виде уже может быть доступен для управления сельскохозяйственным производством, территорией на региональном уровне после включения его в Internet-сеть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков, С.Н. Землеустройство. Землеустроительное проектирование. Внутрихозяйственное землеустройство / С.Н. Волков. – М.: Колос, 2001. – Т. 2. – 648 с.
2. Внутрихозяйственное землеустройство колхозов и совхозов / под ред. Ф.К. Куропатенко. – М., 1963. – 282 с.
3. Удачин, С.А. Землеустроительное проектирование / С.А. Удачин. – 5-е изд. – М.: Колос, 1969. – 560 с.
4. Колмыков, В.Ф. Курсовое и дипломное проектирование по землеустройству: учеб. пособие / В.Ф. Колмыков; Белорус. гос. сельскохозяйственная акад. – Горки, 2002. – 248 с.
5. Сулин, М.А. Землеустройство / М.А. Сулин. – СПб., 2005. – 448 с.
6. Землеустроительное проектирование. Организация территории сельскохозяйственного предприятия: метод. указания / А.В. Колмыков [и др.]. – Горки: БГСХА, 2008. – 92 с.
7. Об утверждении Положения о порядке установления размеров и границ водоохранных зон и прибрежных полос водных объектов и режиме ведения в них хозяйственной и иной деятельности и признании утратившими силу некоторых постановлений Совета Министров Респ. Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 21.03.2006 № 377 (в ред. постановлений Совмина от 04.10.2007 № 1261, от 22.12.2007 № 1801, от 21.07.2008 № 1049).
8. Градостроительство. Районы усадебного жилищного строительства. Нормы планировки и застройки. ТКП45-3.01-117-2008 (02250).

Поступила 04.05.2012

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES IN PROJECT DESIGNING OF FARM BOUNDARY ADJUSTMENT

P. FOMENKO

The article deals with the issues of contents and methodology of project designing of farm boundary adjustment in agricultural organization, in particular issues of land and crop rotation organization. The system of land and crop rotation organization is the basis of further organization of agricultural enterprises. The technology of land-use planning designing with the help of GIS is also suggested. The structural-functional scheme of GIS maintenance of land and crop rotation organization is worked out. It makes it possible to apply the methods of mathematical modeling in farm boundary adjustment. According to the scheme the stages of project creation are considered. The sequence of land organization operations with ArcView GIS is also presented.

УДК 528.72

**ТЕХНОЛОГИЯ И ТОЧНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ
ПЛОЩАДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ENVI****О.А. КУЦАЕВА***(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки)*

Рассматривается наиболее мощный программный продукт, выполняющий автоматизированное дешифрирование, программный комплекс ENVI (Environment for Visualizing Image), разработанный компанией Research Systems, Inc. (США). На базе программного комплекса ENVI создана таблица классификатора (регион интереса – ROI). Разработана технология выполнения автоматизированного дешифрирования площадных объектов на основании таблицы классификатора. Исследованы основные методы автоматизированного дешифрирования, запрограммированные в программном комплексе ENVI. На основе полученных результатов выполнена оценка точности в модуле ENVI Zoot по линейным отклонениям координат вершин площадных объектов.

Введение. В настоящее время при создании и обновлении топографических планов и карт используются достижения современной цифровой фотограмметрии и аэрофототопографии. Практически все основные компоненты современной аэрофототопографии цифровые. При этом получение информации об объектах по материалам дистанционного зондирования выполняется на этапе дешифрирования.

Дешифрирование – один из сложных и трудоемких этапов обработки изображений. Традиционно данный процесс обработки изображений основывается на визуально-инструментальных методах при активном участии человека, что приводит к субъективному отношению к данному процессу и напрямую зависит от уровня подготовленности и опыта специалиста. Кроме того, процесс дешифрирования занимает достаточно много времени [1]. Процесс дешифрирования не нашел широкого применения в производстве. В связи с этим остро встала задача автоматизированного дешифрирования, что значительно сокращает длительность обработки изображений.

Автоматизированный метод дешифрирования – это этап компьютерной обработки данных дистанционного зондирования в форме цифровых изображений [2]. Данный этап включает классификацию, т.е. выделение объектов или классов объектов по их яркости и геометрическим свойствам, а также их последующую обработку и интерпретацию [3, с. 145].

При выполнении как контролируемой классификации, так и неконтролируемой производится отнесение пикселей к определенному классу. Абсолютно идеальных алгоритмов не существует, поэтому погрешности в любом случае неизбежны. В связи с этим необходимо отыскать такой алгоритм, реализация которого позволит в результате дешифрирования наиболее точно отображать изучаемый объект [4].

Одним из программных продуктов, выполняющим автоматизированное дешифрирование, является программный комплекс ENVI. Данный программный комплекс имеет широкий диапазон решаемых задач: от ортотрансформирования и пространственной привязки изображения до получения необходимой информации и ее интеграции с данными ГИС [5]. Однако данный программный комплекс еще не нашел широкого применения из-за его слабой изученности.

В свете вышеизложенного цель настоящей работы – разработка детальной технологии классификации площадных объектов, оценка точности дешифрирования и разработка предложений по применению программного комплекса ENVI в данном направлении.

В соответствии с поставленной целью решаются следующие задачи:

- 1) создание таблицы классификатора (ROI);
- 2) разработка технологии контролируемой и неконтролируемой классификации;
- 3) оценка точности автоматизированного дешифрирования площадных объектов.

В процессе разработки технологии и оценки точности автоматизированного дешифрирования площадных объектов в программном комплексе ENVI использовался экспериментально-статистический метод исследования.

Основная часть

1. Создание таблицы классификатора. Для создания таблицы классификатора в ENVI используется средство ROI – Region of Interest. Каждый элемент ROI определяется своим цветом и ставится в соответствие объекту снимка определенного фона. При этом в контролируемой классификации данный объект снимка выступает в качестве учителя. В случае неконтролируемой классификации таким объектом является центр группировки подобных ему объектов, с определенной точностью считающихся объектами одного класса. Таблица классификатора (ROI) создается по команде Basic Tools>Region of Interest>ROI Tool. Для заполнения таблицы необходимо выбрать объекты, которые безошибочно можно распознать на растровом изображении. В таблице ROI Tool создаются классы (New Regions), их названия (например, водоемы) и цвета. На снимке выбираются обучающие объекты (рис. 1).

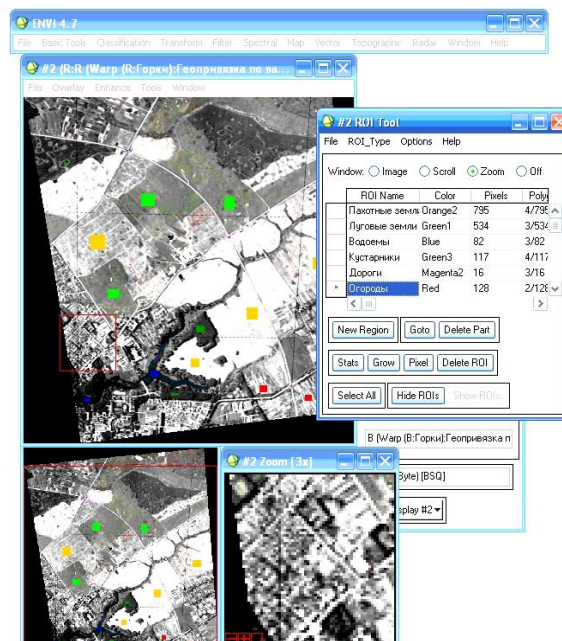


Рис. 1. Выбор обучающих объектов

Выбранные классы объектов сохраняются. На основе созданных классов объектов осуществляется классификация:

1) *контролируемая классификация* (supervised classification) с обучением на эталонных фрагментах изображения, когда для каждого пиксела во всех диапазонах определяются показатели свойств спектрального отражения и сопоставляются с заданными классами спектральных признаков или с таковыми на эталонных объектах (таблица ROI). Данный вид классификации осуществляется следующими методами:

- Parallelepiped (метод параллелепипеда);
- Minimum Distance (метод минимального расстояния);
- Mahalanobis Distance (метод расстояния Махаланобиса);
- Maximum Likelihood (метод максимального правдоподобия);
- Spectral Angle Mapper (метод спектрального угла);
- Spectral Information Divergence (метод расхождения спектральной информации);
- Binary Encoding (метод двоичного кодирования);
- Neural Net (метод нейронной сети);
- Support Vector Machine (метод векторной машинной поддержки);

2) *неконтролируемая классификация* (unsupervised classification), когда разбивка на классы производится автоматически без предварительного обучения на эталонах. Выполняется двумя методами:

- IsoData (данные международной организации по стандартизации);
- K-Means (K-средств).

2. Технология дешифрирования (классификации). Технология *контролируемой классификации* для всех методов дешифрирования аналогична за исключением небольших особенностей. Рассмотрим автоматизированное дешифрирование на примере метода параллелепипеда. Данный метод дешифрирования осуществляется по команде: Classification>Supervised>Parallelepiped. Из списка выбирается файл, для которого выполняется классификация. Выбираются классы объектов в окне Select Classes from Region (Select All Items), задается имя выходного файла, где будет храниться изображение (например, метод параллелепипеда) и имя файла с правилами классификации (рис. 2).

При использовании функции Preview можно предварительно просмотреть результаты классификации. На данном этапе можно подобрать оптимальные параметры дешифрирования, при которых максимально точно распознаются объекты, подлежащие дешифрированию.

После выбора всех параметров классификации и предварительного просмотра результатов нажимают «OK» и выполняется дешифрирование снимка. Файл классификации автоматически добавляется в окне Available Band List в список открытых файлов.

Для просмотра результата классификации изображение загружают на новый дисплей в цвете Gray Scale или RGB (рис. 3 и 4 соответственно).

Таким образом выполняется классификация практически всех методов контролируемой классификации. Исключением являются метод спектрального угла и метод расхождения спектральной информации.

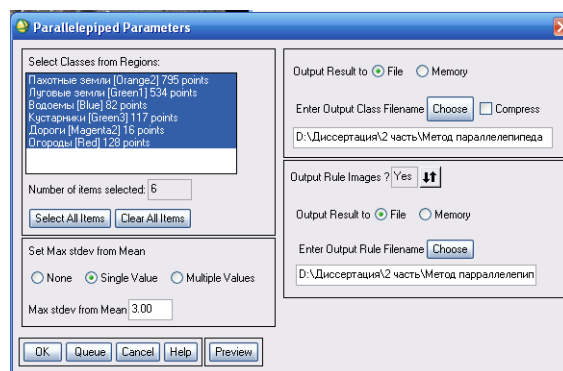


Рис. 2. Ввод параметров для классификации

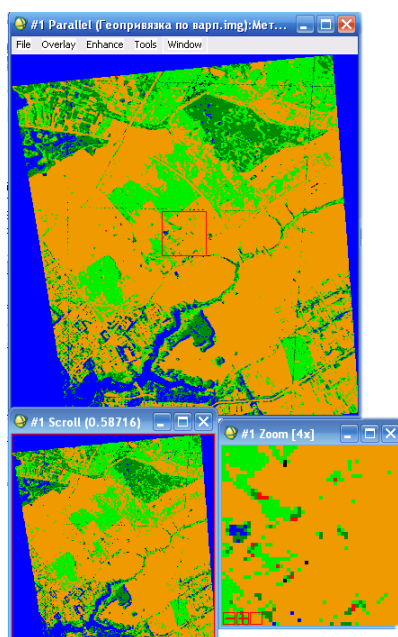


Рис. 3. Отдешифрованное изображение методом параллелепипеда в цвете Gray Scale

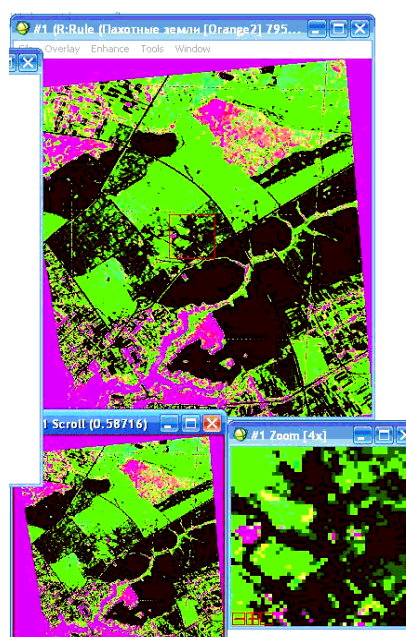


Рис. 4. Отдешифрованное изображение методом параллелепипеда в цвете RGB

Особенностью данных методов является то, что при выполнении классификации после выбора файла для дешифрирования в появившемся окне Endmember Collection: SAM выбирают файл с таблицей классификатора (Import>from POI/EVF from input file...). Затем выбираются классы, подлежащие дешифрированию (если все – Select All Items), и подтверждают свой выбор нажатием клавиши «OK». Применяют (Apply) данный выбор. Вводят имя файла для сохранения и сохраняют («OK»). Загружают изображения в Gray Scale или RGB.

При *неконтролируемой классификации* методом IsoData и Метод K-Means задаются параметры для дешифрирования и имя выходного файла. Выполняется дешифрирование и загружают выходной файл с выполненной классификацией.

3. Преобразование результатов классификации в векторные слои. После выполненного дешифрирования необходимо выполнить векторизацию каждого слоя классификации. Для этого выбираем пункт меню Classification>Post Classification>Classification to Vector. В окне Raster to Vector input Band выбирают из списка файл с результатами классификации и нажимаем «OK». В окне Raster to Vectors Parameters выделяем необходимые классы объектов, выбираем, каким образом будет отображаться векторный слой (каждый класс будет отображаться отдельным векторным слоем или же все классы дешифрирования отображаются одним слоем), и задаем имя выходного файла. В появившемся окне Available Vectors List выделяем все слои и нажимаем Load Selected. Затем в окне Load Vectors выбираем дисплей, на котором будут отображены векторные слои (на новый векторный дисплей или наложением на существующее растровое изображение).

В нашем случае векторный слой (кустарники), созданный в результате классификации, будет отображен на исходном изображении снимка (рис. 5).

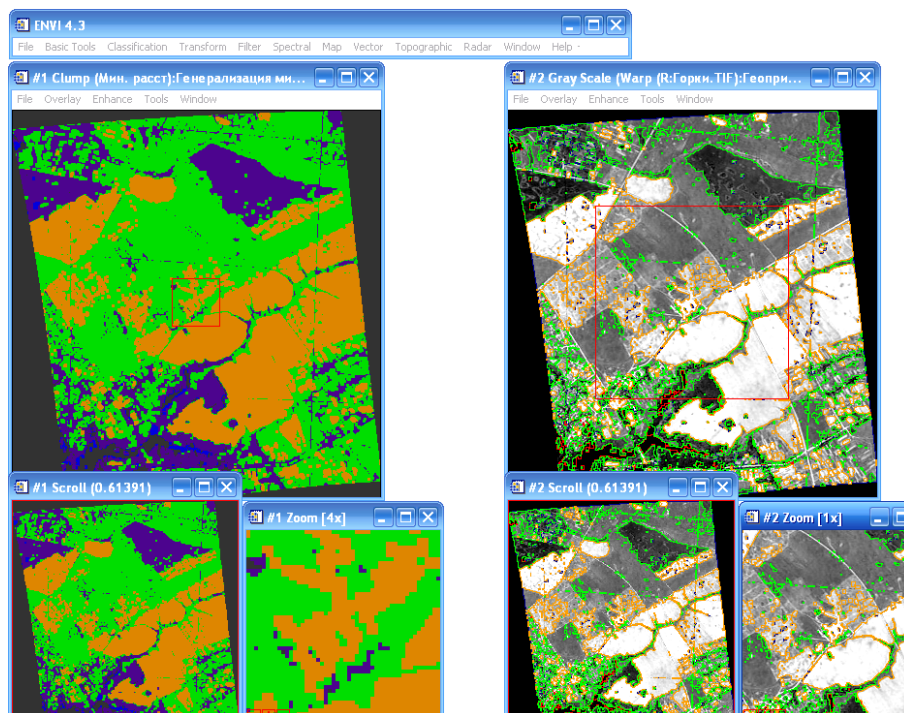


Рис. 5. Результат преобразования классификации в векторный слой

Параметры отображения векторных слоев (цвет слоя при отображении в разных окнах, цвет текущего слоя) можно изменять в окне Vector Parameter.

4. Оценка точности выполненного дешифрирования. Контроль выполнения работ по дешифрированию является составной частью производства, для этого выполняется оценка точности дешифрирования [6].

Для оценки точности дешифрирования был выбран известный площадной объект с четко выраженными границами (базовый объект). Осуществлена его векторизация. Базовый объект выведен на экран в модуле Zoom комплекса ENVI. В дальнейшем считаем, что площадной объект, отдешифрированный вручную, является эталоном для оценки точности. Запускается приложение ENVI Zoom и открывается векторное изображение площадного объекта (базового). Оценку точности для каждого вида автоматизированного дешифрирования, имеющегося в ПК ENVI, производят исходя из линейных отклонений координат вершин контуров (отдешифрированных вручную и автоматически). Для этих целей определим координаты вершин участка пахотных земель с помощью кнопки Feature Counting. Вначале определяют координаты участка отдешифрированного вручную, т.е. ставится курсор на вершину объекта и нажимается левая клавиша мыши, при этом в таблице Feature Counting фиксируются координаты данных вершин.

Далее подгружают слой пахотных земель (в нем находится площадной эталонный объект), полученный при автоматизированном дешифрировании (например, методом параллелепипедов).

С помощью команды задаются параметры для отображения векторного слоя (например, цвет, заливка, толщина границ), нажимаем правую клавишу мыши и в выпадающей таблице выбираем Properties... . Далее в таблице Feature Counting добавляют новую таблицу координат для автоматизированного дешифрирования и фиксируем вершины (рис. 6).

Вначале определяем линейное отклонение вершин (r) от фактического (отдешифрированного вручную) по формуле [7, с. 47]:

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (1)$$

где x_1, y_1 – координаты вершин объекта, отдешифрированного вручную; x_2, y_2 – координаты вершин объекта, отдешифрированного автоматически.

Затем определяем среднюю квадратическую ошибку положения вершин (m) [7, с. 282]:

$$m = \sqrt{\frac{[r^2]}{2n}}, \quad (2)$$

где r – линейное отклонение вершин; n – количество вершин.

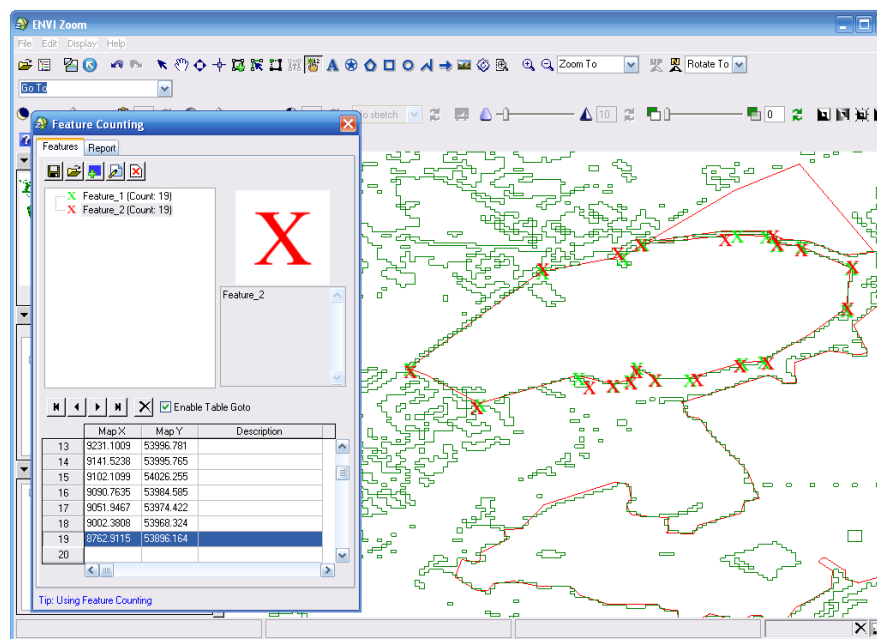


Рис. 6. Координирование поворотных точек отдешифрованного объекта (вручную – зеленым цветом; методом параллелепипеда – красным цветом)

Для вычисления линейных отклонений координат вершин автоматически отдешифрованных объектов и базового объекта воспользовались программой Excel. Значения оптимальных параметров и средних квадратичных ошибок отклонения поворотных точек, вычисленных для каждого способа классификации, приведены в таблице.

Оценка точности дешифрования

№ п/п	Слои	Оптимальные параметры		Средняя квадратическая ошибка, м
		наименование	значение	
1	Парраллелепипеда	Max stdev from Mean	3,0	12,3
2	Минимального расстояния	Max stdev from Mean Max Distance Error	120 200	18,5
3	Расстояния Махалонобиса	Max Distance Error	6	19,4
4	Максимального правдоподобия	Probability Threshold Data Scale Factor	0 255	15,1
5	Спектрального угла	Max Angle (radians)	0,5	18,5
6	Расхождения спектральной информации	Max Divergence Threshold	0,03	17,9
7	Двоичного кодирования	Min Encording Threshold	0,66	25,0
8	Нейронной сети	Training Threshold Contribution Training Rate Training Momentum Training RMS Exit Criteria	0,9 0,2 0,9 0,1	16,2
9	Векторной машинной поддержки	Gamma in Kernel Function Penalty Parameter Classification Probability Threshold	0,333 100 0,1	10,2
10	ISODATA	Max stdev from Mean Max Distance Error	55 50	9,0
11	K-Means	Max stdev from Mean Max Distance Error	55 50	13,5

Анализ данных таблицы позволил сделать вывод о том, что приведенная методика автоматизированного дешифрования свидетельствует о разноточности методов классификации. Наиболее точным оказался метод IsoData (при неконтролируемой классификации), средняя квадратическая ошибка отклонения координат базового объекта, отдешифрованного вручную, и этого же объекта, но отдешифрованного автоматически, составила 9 м, а для контролируемой классификации минимальная среднеквадратическая ошибка составила 10,2 м при использовании метода векторной поддержки.

Закключение. В результате проведенного исследования описана технология автоматизированных методов дешифрирования (классификации) площадных объектов средствами программного комплекса ENVI. Настоящий порядок дешифрирования рекомендуется для производства и может быть использован для дешифрирования линейных и точечных объектов.

Использование программного комплекса ENVI значительно упрощает процесс дешифрирования, сокращает время, затрачиваемое на дешифрирование изображений. Однако, как следует из эксперимента, для повышения точности автоматизированные методы должны уточняться визуальным камеральным дешифрированием с последующим уточнением в полевых условиях.

Автоматизированные методы могут быть эффективными в мониторинге земель сельскохозяйственного назначения. В то же время в дальнейшем необходимо изыскивать методы повышения точности дешифрирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феофилактова, Т.В. Использование модуля Modeler программы ERDAS 9.2 для автоматизации процесса дешифрирования объектов на основе нелинейных спектральных признаков / Т.В. Феофилактова, М.В. Борисова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 6. – С. 47 – 52.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://maps.google.ru/>
3. Кашкин, В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин // Цифровая обработка изображений: учеб. пособие. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
4. Мышляков, С. Картографирование почвенного покрова по данным многозональной космической съемки / С. Мышляков // Земля Беларуси. – 2006. – № 3. – С. 15 – 21.
5. Болсуновский, М.А. Возможности программного комплекса ENVI для обработки данных ДЗЗ / М.А. Болсуновский // Геопрофи. – 2006. – № 3. – С. 16 – 19.
6. Инструкция по дешифрированию аэрофотоснимков и фотопланов в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500 (временная). – Минск, 1997. – 56 с.
7. Маслов, А.В. Геодезия / А.В. Маслов, А.В. Гордеев, Ю.Г. Батраков. – М.: КолосС, 2006. – 598 с.

Поступила 24.05.2012

TECHNOLOGY AND ACCURACY OF AUTOMATED INTERPRETATION AREA OBJECTS IN SOFTWARE COMPLEX ENVI

A. KUTSAYEVA

The article describes software package ENVI (Environment for Visualizing Image), the most powerful software product that performs automated decoding, developed by Research Systems, Inc. (USA). The technology of creation of a qualifier table (region of interest – ROI) is considered on the basis of software package ENVI. The technology of automated decoding of areal objects is created on the basis of the developed qualifier table. The principal methods of automated decoding, coded in software package ENVI, are considered. Based on the results, accuracy evaluation is performed in module ENVI Zoom, on linear deflection of coordinates of the vertices of areal objects, decoded manually (taken as basic) and obtained automatically.

УДК 551.528.2/2(476)

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В РАЙОНАХ ВЗАИМОУСЛОВЛЕННОГО ВЛИЯНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ
И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

*канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА
(Полоцкий государственный университет)*

Исследуется проблема взаимообусловленного влияния тектонических и техногенных факторов на состояние земной коры в районах активной хозяйственной деятельности человека в Республике Беларусь: Старобинское месторождение, Полоцкая ГЭС, магистральные трубопроводы, Островецкая АЭС. Показано, что контролирующие геодезические построения должны охватывать тектонические разломы, к которым обычно оказываются приурочены эпицентры сейсмических событий. Необходимо, чтобы высокоточные GPS-Глонасс измерения в геодезических построениях дополнялись геолого-геофизическими и сейсмологическими исследованиями.

Известно, что оборотная сторона наблюдаемого нами стремительного научно-технического прогресса – ухудшение экологии на планете Земля, возрастание количества аварий на инженерных сооружениях, а также увеличение геологической опасности в целом вследствие взаимообусловленности влияния различных факторов на окружающую среду.

Так, жизнедеятельность людей, связанная с разработкой месторождений полезных ископаемых, строительством и эксплуатацией ГЭС, магистральных трубопроводов, тоннелей и других инженерных сооружений в совокупности с природной тектонической активностью района могут усилить геологическую опасность до катастрофического уровня [5]. Примером такого усиления являются следующие известные примеры:

- Гиссарское землетрясение (23.01.1989, $M = 5,5$, 30 км от Душанбе) произошло в зоне крупного Илякского разлома на глубине 5 – 7 км. Сотрясение в локальной эпицентральной зоне достигло 8 – 9 баллов, но его разрушительный эффект был усилен вследствие оползня, сошедшего на селения и похоронившего сотни людей. Причины оползания: землетрясение, повышенная обводненность рыхлых четвертичных отложений, обусловленная неисправностью проходящего над ними оросительного канала;
- серия Газлийских землетрясений, произошедших на северо-западе сейсмоактивного Узбекистана в 1976 – 1984 годах в районе газового месторождения;
- разрушительное землетрясение в городе Нефтегорск (Сахалин, Россия), в 1995 году (тектоническая активность, усиленная разработкой нефтяного месторождения);
- землетрясение с $M = 6,4$ в Индии, случившееся 11 декабря 1967 года после заполнения водохранилища в районе плотины Койна (погибло 177 человек).

Обширный комплекс подобных проблем может возникнуть и вокруг нефтегазового комплекса при бурении на шельфе Каспийского моря, относящегося к сейсмически неблагоприятному району.

Приведенные примеры свидетельствуют, что в практике изысканий и организации контроля над функционированием ответственных инженерных сооружений, а также состоянием земной коры в районах их расположения следует отходить от доминирующего в настоящее время подхода отдельной оценки каждого вида опасности – сейсмической, гидрогеологической, инженерной, обвально-оползневой и т.д. Надо учитывать взаимообусловленность всех влияний, прежде всего при строительстве АЭС, ГЭС, химических, нефтегазовых сооружений, а также в районах добычи полезных ископаемых. Соответственно этому должен строиться и наш подход к мониторингу окружающей среды и прогнозу неблагоприятных ситуаций.

Территория Республики Беларусь не является исключением. Она имеет сложное геологическое строение, содержит различные тектонические структуры и разломы разной степени тектонической активности. В Беларуси эксплуатируются месторождения полезных ископаемых, проходят магистральные газо- и нефтепроводы, строятся ГЭС и, наконец, АЭС. Для нашей страны можно привести достаточно большое число примеров сочетания тектонических и техногенных влияний на состояние земной коры.

В данной работе рассмотрим Старобинское месторождение, магистральные трубопроводы, Полоцкую ГЭС и проектируемую Островецкую АЭС.

Старобинское месторождение

Старобинское месторождение – крупнейшее месторождение калийных солей, расположено в северо-западной части тектонически-активной структуры Припятский прогиб на территории Минской области. Оценкой возможного влияния последствий его эксплуатации на тектонику района занималось большое число известных исследователей (В.Н. Губин, Г.И. Каратаев, А.Г. Аронов, Т.И. Аронова и др.). Результаты исследований показали, что многолетняя эксплуатация Старобинского месторождения привела в XXI веке к сложной экологической ситуации в районе, вызванной засолением почв и подземной гидросферы,

трансформацией рельефа земной поверхности, активностью сейсмотектонических процессов и другими изменениями геологической среды.

Недостатком этих исследований, на наш взгляд, является слабое использование возможностей метода повторных геодезических измерений, которые на данном месторождении ведутся практически в пределах подрабатываемых территорий, почти не затрагивая тектонические разломы, ответственные за возможные сейсмические катастрофы. Ввиду того, что грамотно поставленные повторные геодезические измерения, дополненные геолого-геофизическими и сейсмологическими исследованиями, позволяют зафиксировать деформации объекта, вызванные как тектоническими факторами, так и обусловленные совокупностью различных воздействий. Обратим внимание на тектоническое строение района месторождения.

В структурном отношении Старобинское месторождение приурочено к Старобинской центриклинали, центральное место в которой занимает Стоходско-Могилевский разлом (рис. 1).

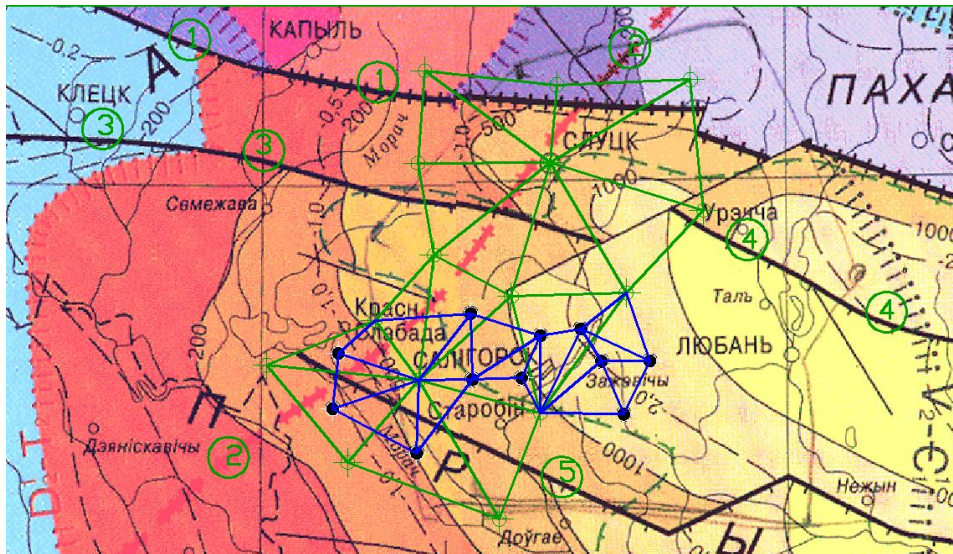


Рис. 1. Расположение тектонических разломов в районе Старобинского месторождения [4] и предлагаемая схема геодинамического полигона в виде треугольников (зеленым обозначены геодезические построения 1-го уровня; синим – геодезические построения 2-го уровня).
Тектонические разломы: 1 – Северо-Припятский; 2 – Стоходско-Могилевский;
3 – Ляховичский; 4 – Речицкий; 5 – Червонослободско-Малодушинский

По данным геофизических, аэрогеологических и горно-геологических исследований на месторождении установлены три тектонические зоны [2; 6]:

- 1) северная тектоническая зона (соответствует отдельным звеньям Ляховичского и Речицкого разломов);
- 2) южная тектоническая зона (содержит часть Червонослободских тектонических нарушений);
- 3) центральная зона (сопряжена с одним из фрагментов Стоходско-Могилевского суперрегионального разлома).

На рисунке 2 приведена карта проявления сейсмотектонических процессов на территории Беларуси [1], согласно которой максимальная концентрация землетрясений наблюдается в районе Солигорска. Эпицентры землетрясений приурочены к тектоническим разломам: Стоходско-Могилевскому, Северо-Припятскому, Ляховичскому, Речицкому и т.д.

Анализ землетрясений, наблюдаемых в течение последних 40 лет в районе Старобинского месторождения, которое разрабатывается с 1961 года, также показал на их приуроченность к тектоническим разломам. Так, землетрясение 10.05.1978 (д. Кулаки) силой 4 – 5 баллов произошло вблизи Червонослободского разрывного нарушения; землетрясение 02.12.1983 (к = 9) – на пересечении Стоходско-Могилевского и Северо-Припятского тектонических разломов; землетрясение 15.03.1988 (5 баллов) приурочено к Стоходско-Могилевскому тектоническому разлому; эпицентры серии землетрясений, наблюдаемых с января по сентябрь 1999 года, располагаются в центральной и южной тектонических зонах, т.е. опять же связаны с указанными тектоническими разломами.

Таким образом, эксплуатация месторождения не только вызвала изменения рельефа из-за просадки земной поверхности, засоление почвы, но и активизировала сейсмотектонические процессы на разломах, контролирующих территорию разработок и город Солигорск со 100-тысячным населением, что может привести к катастрофическим событиям. Поэтому в районе Старобинского месторождения

необходимо организовать геодинамический полигон (ГДП), территория которого охватывала бы все тектонические структуры и разломы: Северо-Припятский, Ляховичский, Речицкий, Червонослободско-Малодушинский и Стоходско-Могилевский (см. рис. 1).

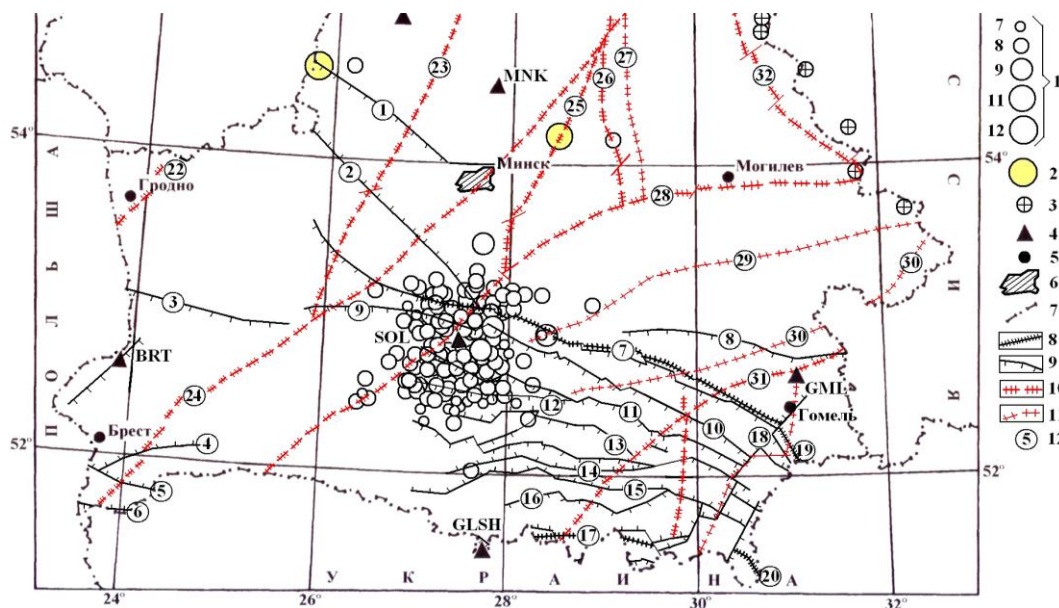


Рис. 2. Карта проявления сейсмотектонических процессов на территории Беларуси¹:

- 1 – энергетический класс землетрясений; 2 – эпицентр исторического землетрясения; 3 – землетрясение по данным международных центров; 4 – сейсмическая станция; 5 – населенный пункт; 6 – город; 7 – государственная граница; разломы, проникающие в чехол: 8 – суперрегиональные, ограничивающие крупнейшие надпорядковые структуры; 9 – региональные и субрегиональные; разломы, не проникающие в чехол: 10 – суперрегиональные, разграничивающие крупнейшие области разного возраста переработки; 11 – региональные и субрегиональные; 12 – названия разломов (1 – Ошмянский, 2 – Налибокский, 3 – Свислочский, 4 – Дивинский, 5 – Северо-Ратновский, 6 – Южно-Ратновский, 7 – Северо-Припятский, 8 – Суражский, 9 – Ляховичский, 10 – Речицкий, 11 – Червонослободско-Малодушинский, 12 – Копаткевичский, 13 – Шешовичский, 14 – Сколодинский, 15 – Наровлянский, 16 – Ельский, 17 – Южно-Припятский, 18 – Лоевский, 19 – Северо-Днепровский, 20 – Южно-Днепровский, 21 – Полоцкий, 22 – Лосто-Коский, 23 – Кореличский, 24 – Выжевско-Минский, 25 – Борисовский, 26 – Чашникский, 27 – Бешенковичский, 28 – Стоходско-Могилевский, 29 – Кричевский, 30 – Чечерский, 31 – Пержанско-Симоновичский, 32 – Витебский)

Геодезическую сеть ГДП можно организовать в виде двух уровней:

- первый уровень контролирует региональные разломы и состоит из 14 пунктов;
- второй уровень охватывает подработанную территорию и состоит также из 14 пунктов, 4 из которых совмещены с сетью первого уровня.

Измерения следует выполнять двухчастотными спутниковыми приемниками с частотой примерно один раз в год. Геодезические исследования, конечно, должны сопровождаться геофизическим и сейсмологическим мониторингом.

Полоцкая ГЭС

Полоцкая ГЭС запроектирована на реке Западной Двине у деревни Лучно. Она является частью каскада ГЭС на Западной Двине, состоящего из проектируемых белорусских ГЭС (Полоцкой, Бешенковичской, Витебской, Верхнедвинской) и построенных в 1930 – 1970 годы латвийских ГЭС (Кегумская, Плявиньская и Рижская общей мощностью более 1000 МВт).

В районе латвийских ГЭС наблюдалась серия землетрясений (1976 г. – землетрясение в Эстонии силой 6 баллов, ощущалось и в Риге; 2004 г. – Калининградское землетрясение силой 6 баллов, в Латвии – 5 баллов; декабрь 2004 г. – мерзлотные землетрясения в Риге и Даугавпилсе).

Аналогичная ситуация может возникнуть и в районе Полоцкой ГЭС, меньшей по мощности, но строящейся на той же самой реке и принадлежащей практически к тому же самому Полоцко-Курземскому поясу тектонических разломов, что и гидроэлектростанции прибалтийского государства.

¹ Составила Т.И. Аронова, расположение разломов дано с использованием материалов монографии «Геология Беларуси», 2001.

В 2006 году в районе ГЭС [9] выполнялись предпроектные геодинамические исследования, в ходе которых было установлено, что плотина Полоцкой ГЭС находится в зоне влияния двух глубинных разломов – Полоцкого и Чашникского (рис. 3). Разломы этой категории характеризуются избытком оперяющихся локальных разломов.

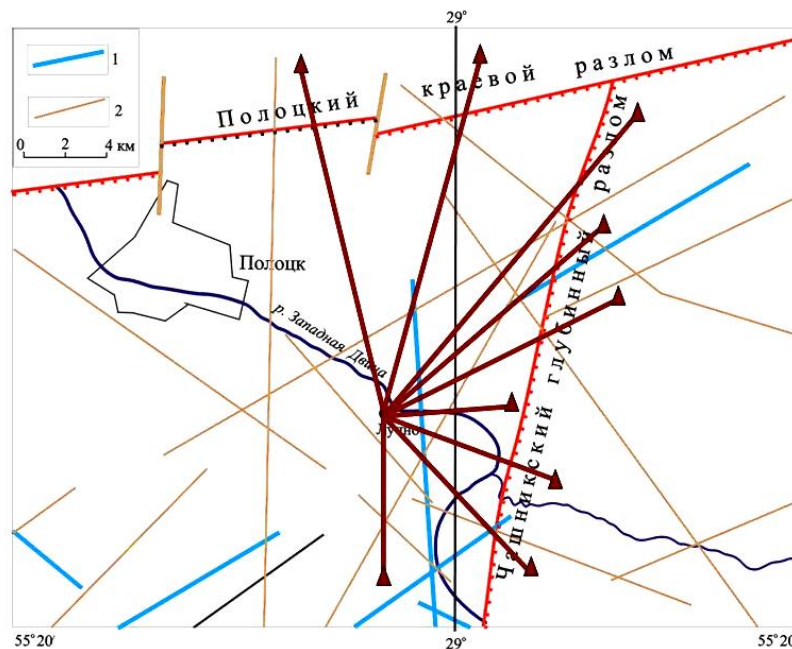


Рис. 3. Схема Полоцкого геодинамического полигона, наложенная на фрагмент схемы разломов литосферы Беларуси в районе Полоцкой ГЭС: 1 – флексурно-разломные зоны активизации; 2 – разломы кристаллического фундамента. Коричневыми линиями показаны стороны геодезической сети Полоцкого геодинамического полигона, запроектированной в виде обсерватории с центром в районе плотины ГЭС (Лучно)

Кроме того, была составлена детальная схема расположения тектонических разломов на площадку Полоцкой ГЭС и установлено следующее:

- в месте проектируемого расположения плотины гидроузла в кристаллическом фундаменте присутствует фрагмент относительно региональных разломов, который является причиной излучины реки;
- наличие сейсмической опасности на площадке строительства от возникновения местных небольших, а также сильных землетрясений других регионов.

В результате выполнения исследования даны рекомендации Витебскэнерго о необходимости выполнения постоянного геодинамического мониторинга (сейсмологического, геодезического и геофизического) в районе размещения Полоцкой ГЭС и прилегающих территорий с целью прогноза возможного проявления наведенной или вызванной сейсмичности.

Дальнейшие исследования 2006 – 2010 годов по ГПОФИ не только подтвердили опасения [9] о непростой сеймотектонической обстановке в районе строительства Полоцкой ГЭС, но и усилили их. Оказалось, что установленные на этапе предпроектных исследований фрагменты относительно региональных разломов в кристаллическом фундаменте проявили себя как развивающиеся разломные зоны, способные привести к дестабилизации геодинамической обстановки вблизи них. При этом вызывающие опасения активные процессы связаны прежде всего с зоной динамического влияния Туровлянского разлома, секущего р. Западную Двину в месте строительства гидроузла Полоцкой ГЭС [3].

В связи с этим в районе Полоцкой ГЭС также необходимо создать геодинамический полигон с контролирующими разломы геодезическими и геофизическими построениями. Здесь, на наш взгляд, следует организовать систему GPS-Глонасс наблюдений в виде обсерватории с центром вблизи плотины (см. рис. 3). Радиальная система линий, пересекая вызывающие опасения разломы (Чашникский, Полоцкий, Туровлянский), будет контролировать их.

Магистральные трубопроводы Беларуси

Известно, что магистральные нефте- и газопроводы относятся к классу ответственных и экологически опасных инженерных сооружений. Они распространяются на многие километры и пересекают большое число тектонически-активных структур и разломов. К сожалению, аварии на них не являются

редкостью и часто составляют порядка 80 % от их общего числа [7; 8], наблюдается приуроченность аварий на магистральных трубопроводах к тектоническим разломам и тектонически-активным структурам.

Выполненный в [8] анализ свидетельствует о наличии фактора геолого-тектонической обусловленности аварий на магистральных трубопроводах Беларуси, который в совокупности с техногенным воздействием (нагрев труб, изменение давления) усиливает вредные влияния на устойчивость трубопровода, разрушая его.

Понятно, что рассчитать комплексное влияние тектонических, геологических, грунтовых, климатических и техногенных факторов на напряженно-деформированное состояние трубопровода при существующем подходе сложно, так как трудно определить и отделить каждое отдельное влияние, а затем вывести из совокупности всех влияний некоторый результирующий вектор. Поэтому в инженерных расчетах магистральных трубопроводов обычно оценивают отдельно влияние грунтовых или технологических факторов, практически не учитывая геодинамические факторы, что неправильно.

На наш взгляд, выходом из сложившейся ситуации может послужить постановка повторных геодезических измерений по деформационным маркам, установленным в местах частых аварий на трубопроводе. Это позволит определить количественные характеристики изменения положения трубопровода от его проектного положения, вызванного всем комплексом воздействий. По всей видимости, для оценки изменения напряженно-деформированного состояния магистрального трубопровода в данном случае потребуются и несколько иные вычислительные схемы.

Атомная электростанция

Известно, что в Республике Беларусь выбрали площадку под строительство АЭС и практически уже приступили к ее возведению. В выполнении предпроектных геодинамических исследований принимали участие такие организации, как Институт природопользования и Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси, РУП «Белгеодезия», которые дали заключение о наиболее подходящем месте для размещения объектов Белорусской АЭС в районе деревни Островец Гродненской области.

Тем не менее нельзя не отметить, что Островецкая площадка находится в зоне влияния тектонически-активного Ошмянского разлома (рис. 4), вблизи которого в 1908 году произошло самое крупное в истории Беларуси (7-балльное) Гудогайское землетрясение. Этот факт настораживает. По нашему мнению, следует, по крайней мере, наладить систему контроля над активностью расположенных в районе площадки разломов.

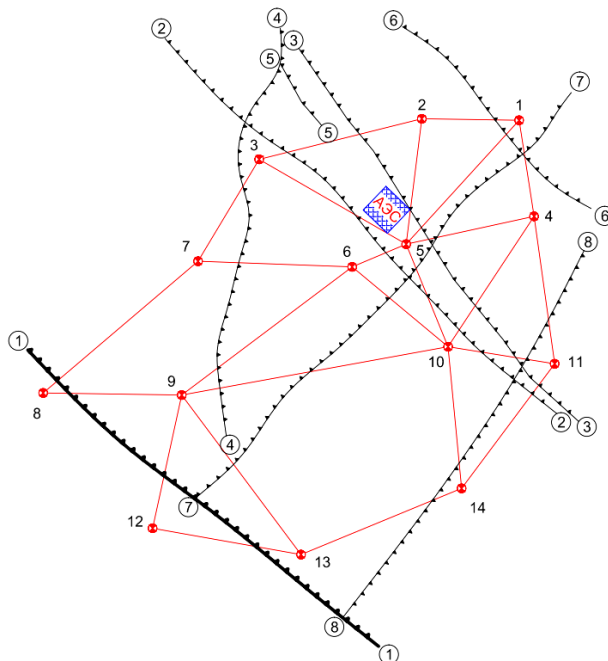


Рис. 4. Схема контролирующих разломы геодезических построений в районе Островецкой АЭС:
1 – 1 – Ошмянский разлом; 4 – 4 – Гудогайский разлом; 1, 2, 3... 14 – пункты GPS-Глонасс сети

Предлагаемая нами схема контролирующих построений (см. рис. 4) нацелена на использование двухчастотных GPS-ГЛОНАСС приемников, закреплена надежными, максимально устойчивыми к влияниям нетектонического происхождения центрами, снабженными устройствами для принудительного

центрирования. Методика измерений должна позволить получить характеристики движений на тектонических разломах с точностью первых миллиметров.

Геодезические наблюдения следует также дополнить геофизическими и сейсмологическими исследованиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аронова, Т.И. Особенности проявления сейсмотектонических процессов на территории Беларуси / Т.И. Аронова // Литосфера. – 2006. – № 2(25). – С. 103 – 110.
2. Экология геологической среды: учеб. пособие / В.Н. Губин [и др.]. – Минск: БГУ, 2002. – 133 с.
3. Каратаев, Г.И. Отчет о результатах научно-исследовательских работ по заданию 40 «Заложить геофизические реперы и создать локальные сети полигонов: Полоцкого – в 2006 году, Краснелободского – в 2007 году, Лидского – в 2008 году, Борисовского – в 2009 году, Глушкевичского – в 2010 году» Государственной программы развития Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь на 2006 – 2010 годы / Г.И. Каратаев, О.В. Мясников; Ин-т природопользования НАН Беларуси. – Минск, 2010.
4. Тэктанічная карта Беларусі // Нацыянальны атлас Беларусі / Камітэт па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэсп. Беларусь. – Мінск, 2002. – С. 46 – 47.
5. Трифонов, В.Г. Стихийные бедствия в системе современных геодинамических процессов / В.Г. Трифонов // Современная геодинамика и глубинное строение территории СССР. – М.: Наука, 1990. – С. 11 – 16.
6. Тяшкевич, И.А. Новейшая геодинамика горнорудных районов по космогеологическим данным / И.А. Тяшкевич, А.Р. Понтус [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geology.by/component/content/section/37.html?layout=blog&start=18>.
7. Ульмасвай, Ф. Геологические условия возникновения зон потенциальной аварийности магистральных газопроводов на севере Западной Сибири / Ф. Ульмасвай // Газовая промышленность. – 1997. – № 7. – С. 37 – 38.
8. Геолого-тектонические условия возникновения аварийности на магистральных нефтепроводах Белоруссии / Г.А. Шароглазова [и др.] // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – СПб., 2008. – № 1. – С. 58 – 60.
9. Выполнение предпроектных геодинамических исследований в районе предполагаемого строительства Полоцкой ГЭС: отчет о НИР / Полоцкий гос. ун-т; Г.А. Шароглазова [и др.]. – Новополоцк, 2006. – 64 с. – ХД НИР № 6-1153/26552.

Поступила 07.06.2012

GEODYNAMIC RESEARCH PROJECTION IN THE ZONES OF MUTUALLY CONDITIONED INFLUENCE OF TECTONIC AND TECHNOGENIC FACTORS ON THE EARTH'S CRUST CONDITION

G. SHAROGLAZOVA

The issue of mutually conditioned influence of tectonic and technogenic factors on the state of the Earth's crust in the zones of active economic activity in the Republic of Belarus is under consideration. The study covers the following places: Starobynskoye minefield, Polotsk hydro-electric power station, mainland pipelines, Ostrovetskaya Atomic Power Station. It is shown that monitoring geodesic constructions must cover tectonic faults, which commonly turn out to be epicenters of seismic events. It is necessary to supplement highly-precise GPS-GLONASS measurements in geodesic constructions by geological-geophysic and seismological studies.

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА

<i>Лаврецкий Г.А.</i> Модель Святой Земли в сакральной топографии Полоцка.....	2
<i>Колосовская А.Н.</i> Архитектура костелов XVII – XIX веков: особенности объемно-пространственной композиции ...	6
<i>Платонова Р.М., Платонова М.А.</i> Планировка и застройка главной площади Полоцка в конце XVIII – начале XIX века	11
<i>Лаврецкий Н.Г.</i> Характерные черты архитектурно-стилистического облика протестантского храма на территории Беларуси	18
<i>Харма Усама Мохаммад</i> Формирование и развитие базиликальной архитектуры Сирии IV – VII веков	22

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

<i>Рак Н.А., Тамкович С.Ю.</i> Анализ методов расчета прочности элементов из тяжелого бетона без поперечной арматуры при продавливании на основе расширенного банка экспериментальных данных.....	25
<i>Киселев В.Н.</i> Напряженное состояние тонкостенного стержня	32
<i>Бадалова Е.Н.</i> Жесткость и трещиностойкость железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных арматурой из углеродных волокон	46
<i>Колтунов А.И., Бакатович А.А., Лымарева В.И.</i> Оценка расчетной прочности эксплуатируемых железобетонных конструкций по методикам различных норм	51

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Никитин В.И., Кофанов В.А.</i> Определение коэффициента извилистости капилляров строительных материалов при расчете влагопереноса	57
<i>Язубкин А.Н., Бозылев В.В.</i> Обоснование механизма повышения прочностных показателей арболита с направленной укладкой заполнителя	63
<i>Шабанов Д.Н., Иваненко А.М.</i> Использование ультразвука для контроля в процессе производства прочности силикатного кирпича, получаемого из отходов литейной промышленности	67
<i>Парфенова Л.М.</i> Эффективность армирования бетонов волокнами нитрона	72
<i>Максимович Е.С., Сакевич В.Н.</i> Влияние ультразвуковой обработки на свойства эмульсионных смазок для опалубки при производстве сборного и монолитного железобетона	78

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

<i>Липский В.К., Спириденко Л.М., Комаровский Д.П., Кульбей А.Г., Воронин А.Н., Янушонек А.Н.</i> Техническое регулирование вопросов строительства и ремонта магистральных нефтепроводов	85
<i>Воронин А.Н., Липский В.К., Серенков П.С.</i> Об актуальности информационно-аналитической записки в магистральном трубопроводном транспорте при техническом регулировании	89
<i>Нияковский А.М.</i> Формирование рациональной теплоэнергетической системы предприятий железобетонных изделий при их модернизации	93
<i>Спириденко Л.М., Бондарчук А.И.</i> Комплексная безопасность стальных резервуаров нефти и нефтепродуктов	99
<i>Нияковский А.М., Гончаров Э.И., Добросольцева Е.С.</i> Организация процесса охлаждения пропарочных камер после окончания термообработки изделий из железобетона	103

ГЕОДЕЗИЯ

<i>Будо А.Ю., Мицкевич В.И.</i> Алгоритм перехода от нелинейного к линейному обобщенному методу LP-оценок	107
<i>Головань Г.Е., Шевелев И.П., Ялтыхов В.В.</i> Сравнение двух методов оценки точности нуль-свободных плановых геодезических сетей, не содержащих исходных пунктов	112
<i>Грищенко А.В., Грищенко Е.В.</i> Новый метод решения систем условных уравнений при коррелятном способе уравнивания	117
<i>Сырова Н.С.</i> Оценка точности нуль-свободных геодезических сетей различными способами	122
<i>Усов Д.В.</i> Равноточные геодезические нивелирные сети и их применение на геодезическом производстве ...	126
<i>Мицкевич В.И., Ялтыхов В.В., Субботенко П.В.</i> О новом методе математической обработки измерений и о перспективах дальнейшего развития теории уравнивательных вычислений	129
<i>Шнитко С.Г.</i> Алгоритмы уравнивания и оценки точности геодезических сетей нелинейными методами	133
<i>Подшивалов В.П., Акреш Мохаммед Сабри Али</i> Коэффициенты характеристического уравнения в проекции Русселя	136
<i>Михеева А.А., Медведев В.И.</i> Расчет разрешения при сканировании аэрофотоснимков для обеспечения точности определения координат	141
<i>Писецкая О.Н.</i> О преобразовании координат пунктов геодезической сети Республики Беларусь из референцной системы СК-42 в общеземные системы координат ПЗ-90 и WGS-84	146
<i>Фоменко П.Н.</i> Геоинформационное обеспечение организации земель при внутрихозяйственном землеустройстве ...	153
<i>Куцаева О.А.</i> Технология и точность автоматизированного дешифрирования площадных объектов в программном комплексе ENVI	160
<i>Шароглазова Г.А.</i> Проектирование геодинамических исследований в районах взаимообусловленного влияния тектонических и техногенных факторов на состояние земной коры.....	166